

L'énergie des marées

Gibrat, Robert

Veröffentlicht in:
Abhandlungen der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft Band 10, 1958,
S.54-92



Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig

L'énergie des marées

par R. Gibrat, Paris avec 22 figures. Vorgelegt von Herrn M. Kohler

A. Théorie des marées

En apparence, une des plus puissantes manifestations de la nature, la marée, est produite par des forces infimes. Déroutant phénomène, car si sur les côtes françaises (fig. 1) une double pulsation chaque jour amène et remène le flot, la renverse simultanée du courant et de la montée des eaux a lieu dans l'Atlantique mais n'est pas observée dans la Manche.

Déroutant encore, car si à Do-Son, au Tonkin (fig. 2) il y a une seule pleine mer toutes les 24 heures, par ailleurs à Tahiti, l'action du Soleil trouvant une meilleure résonance que celle de la Lune, la marée, de faible amplitude d'ailleurs, ne devient appréciable qu'en vive-eau (concordance des actions

M.T.S.T Michel

2 pleines mers par jour

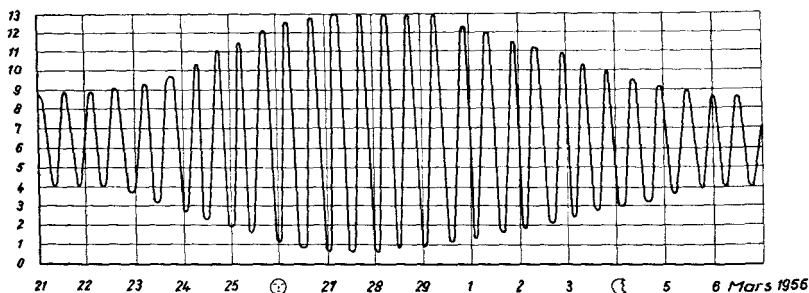


Fig. 1

lunaire et solaire), la pleine mer se produisant alors sensiblement à heure fixe; déroutant enfin, car au Mont Saint-Michel, l'amplitude dépasse treize mètres et en Méditerranée elle n'atteint normalement que quelques décimètres.

La vérité n'est apparue que très lentement, car notre civilisation est née et a grandi dans la Méditerranée aux marées inexistantes, aussi l'Antiquité

DO - SON (TONKIN)

1 pleine mer par jour

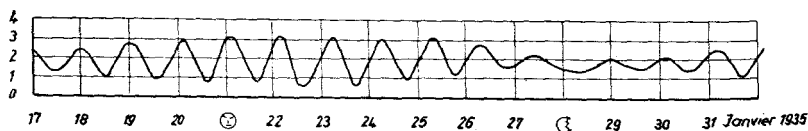


Fig. 2

et la Renaissance ne produisirent que des enfantillages à propos des marées. Les contemporains de Platon avaient, par l'observation des amplitudes et des heures, une certaine intuition portant sur des combinaisons plus ou moins complexes des périodicités et pressentaient que courants et hauteur d'eau étaient deux aspects différents d'un même phénomène. Mais ils assimilaient la terre à un véritable être humain et les marées en étaient la respiration. Platon, lui-même, pense à des oscillations dans des cavernes souterraines, hypothèse que, ô horreur, reprendra beaucoup plus tard Kepler.

Avec les voyages au delà de Gibraltar, vers Thulé, au IV^e siècle avant J. C., Pythéas, puis au 1^{er} siècle Posidonius, le professeur de Cicéron, l'influence de la lune sera suspectée, puis bientôt entièrement oubliée. Seul, au Moyen-Age, un curieux passage de Dante dans «le Paradis» pourra être interprété comme une survivance. Même Galilée, le créateur de la Mécanique moderne, refuse de donner à la lune un rôle dans la production des marées et accumule les fautes de raisonnement sur l'effet sur les molécules d'eau de la rotation de la terre et de son mouvement de translation.

Nous voici en 1657, Pascal commence à écrire les «Pensées» et celle n°319 (Pléiade) qui commence par cette banalité: «L'éloquence continue ennue», finit par cette phrase: «La nature agit par progrès, itus et relictus. Elle passe et revient, puis va plus loin, puis deux fois moins, puis plus que jamais, etc...» Le flux de la mer se fait ainsi, le soleil semble marcher ainsi...» et un dessin suit, le seul croyons-nous dans les «Pensées». Pas la moindre trace d'une explication, même sommaire.

Après Newton, trente années après Pascal, tout un pan d'ignorance s'écroule et la lumière devient si vive qu'on a un sursaut d'indignation devant le jugement méprisant de Poincaré: «La marée de Newton, marée du baccalauréat.»

Dans la théorie de Newton, la cause est dans la variation le long des heures et des jours de l'attraction exercée par la lune et le soleil sur les molécules des océans, on explique ainsi immédiatement le décalage des heures de pleine mer suivant la lune, les modifications d'amplitude le long d'une demi-lunaison, les marées de vives-eaux lors des conjonctions heureuses de la lune et du soleil. Tout devient si clair que cela suffit pour prédire les marées en un point, de nombreuses années d'avance, d'après les observations du passé au même point avec toute la précision nécessaire pour les besoins de la navigation et des travaux publics.

Mais Newton ainsi n'explique pas les variations d'un point à l'autre. Or quand on évalue les forces en jeu, on est confondu de leur petitesse. La variation la plus grande apportée par la lune à l'attraction terrestre sur une molécule d'eau, est six millions de fois plus petite que l'intensité de la pesanteur, elle est égale à celle que nous provoquons nous-mêmes sur le poids de notre montre-bracelet quand nous élevons notre poignet de 55 centimètres. Le soleil, parent pauvre, est deux fois moins agissant que la lune. La surface libre des mers, si elle restait en équilibre, et c'est là l'hypothèse essentielle de Newton, aurait ainsi, sous l'effet de la variation de la composante horizontale de la pesanteur, une marée de 55 centimètres, et sous celui de la variation de la composante verticale, une marée de 9/10^e de millimètre. Il resterait ainsi au Mont Saint-Michel plus de treize mètres de marée sans explication. Newton ne suffit

donc pas pour comprendre. Aucune théorie comme la sienne n'a donné plus aisément l'illusion de pénétrer la nature profonde d'un phénomène et ainsi contribué à répandre plus d'idées fausses.

Car la surface des mers ne peut rester en équilibre, les eaux jouent à se poursuivre et ne trouvent jamais leur repos. Laplace, le premier, en 1774, introduit l'Hydrodynamique dans la théorie des marées, met l'accent sur la résonance entre les périodes célestes et celles d'oscillation des divers bassins comme la Manche, donne les équations exactes des marées, trouve les premiers théorèmes. Mais l'intégration des équations n'est apparue possible tout au long du XIX^e siècle que dans quelques cas particuliers et la grande contribution de Henri Poincaré, en 1909, a précisément été de montrer comment le problème pouvait être complètement résolu dans tous les cas, mêmes les plus généraux. Il a utilisé les théories de Fredholm sur les équations intégrales et au moyen de calculs bien définis, quoique encore très longs, montré qu'il est possible de traiter numériquement le problème des marées. Poincaré nous a ainsi permis d'entrevoir le moment où l'on pourra calculer une marée en un point, sans utiliser l'observation préalable.

Mais en 1909, l'extraordinaire effort que représente cet apport de Poincaré relève du divertissement pascalien, au sens de la Pensée 205 (Pléiade):

«Et un autre suera dans son cabinet pour montrer aux savants une question de chiffres, impénétrable à tout autre, qu'il aura résolue»

Personne n'a encore eu alors l'audace de vouloir par l'oeuvre de l'homme, modifier le régime des marées, tous les problèmes peuvent se résoudre par l'observation, et Newton suffit. Mais aujourd'hui, l'ingénieur français veut exploiter cet extraordinaire gisement d'énergie qu'est la Manche, et particulièrement la baie du Mont Saint-Michel avec ses dix millions de kilowatts reste un espoir dans l'incertitude atomique. Le rapport des énergies à prendre et des énergies actuellement mises en jeu par la mer n'est plus négligeable: la marée sera sûrement modifiée; il nous faut savoir de combien et comment. Poincaré retrouve ainsi, en 1955, toute son importance, et c'est grâce à l'impulsion ainsi donnée par lui, que les calculs pourront être menés à leur terme. Ils sont, dès maintenant, en cours, grâce aux travaux récents de l'océanographe Hansen et aux méthodes inspirées de la relaxation.

B. Caractéristiques des marées

On définit l'amplitude de la marée ou marnage par la différence de niveau entre une pleine mer et une basse mer consécutives. Elle varie suivant les positions relatives de la lune et du soleil, et atteint sa plus grande valeur en vive-eau, de un à quatre ou cinq jours après la nouvelle ou la pleine lune, et revient à sa plus faible valeur en morte-eau, de un à quatre ou cinq jours après que la lune est arrivée dans son premier ou dernier quartier.

Enfin nous donnerons quelques renseignements sur leurs périodicités.

a) Période Chaldéenne — Le phénomène des marées se reproduit à peu près identique à lui-même tous les dix-huit ans environ (plus précisément au bout de 223 lunaisons, période chaldéenne), mais il n'est évidemment pas nécessaire, dans une étude même très soignée, de considérer une période aussi longue.

b) Période annuelle — Entre deux marées quelconques, on constate quelques différences dans les formes des courbes d'onde, mais ces différences sont peu importantes et elles se compensent sensiblement, en sorte que l'énergie disponible est à peu près constante d'une année à l'autre. Il n'y a donc ni «années sèches», ni «années humides».

c) Période lunaire (29 jours 1/2) — On constate, en comparant deux lunaisons quelconques, au cours de l'année, que les énergies disponibles diffèrent de

Angleterre

1	Clovelly	12	Cardiff (Penarth)
2	Ilfracombe	13	Barry
3	Porlock	14	Nash point
4	Watchet	15	Port Talbot
5	Burnham	16	Swansea
6	Portishead	17	Worms Head
7	Bristol (King Roads)	18	Burry Llanelly
8	Bristol (Rivière Wye)	19	Riv. Towy: Ferryside
9	Beachley pier (Riv. Severn)	20	Tenby
10	Chepstow (Rivière Wye)	21	Riv. Dee: Ile Hilbre
11	Newport	22	Liverpool
		23	Riv. Lytham
		24	Preston
		25	Riv. Wyre: Fleetwood
		26	Morecambe
		27	Barrow Docks
		28	Whitehaven
		29	Silloth
		30	Ramsey
		31	Abbey Head

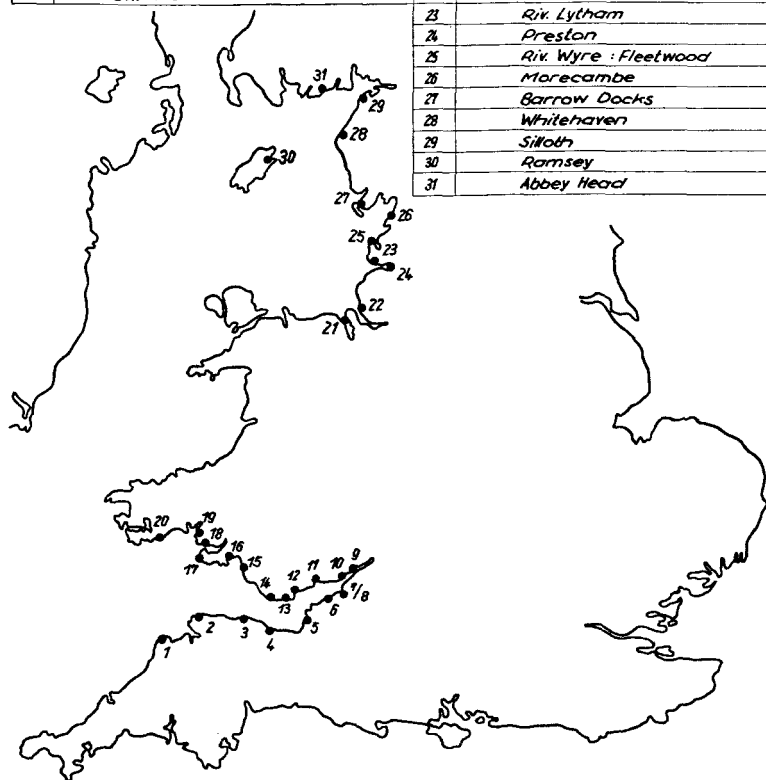


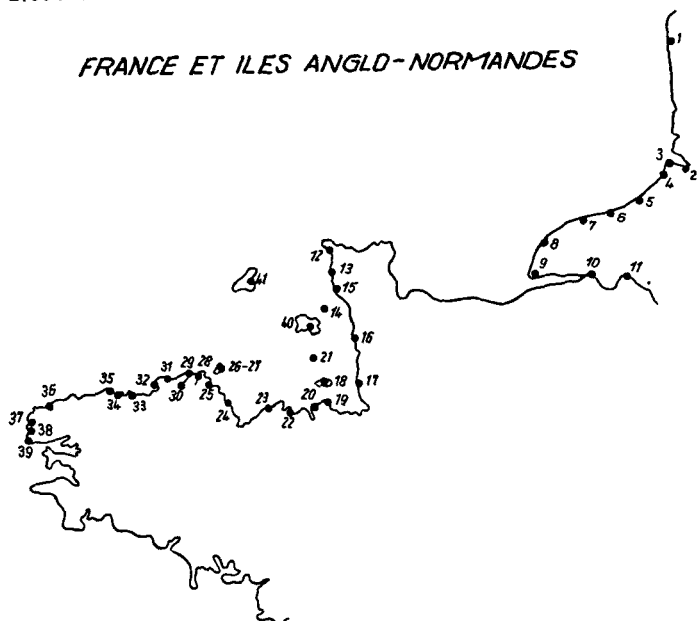
Fig. 3 Index I

moins de 5 % de leur valeur moyenne. Il n'y a donc ni «mois secs», ni «mois humides», ni «été», ni «hiver».

d) Variations diurnes — L'énergie disponible varie d'un jour à l'autre, le rapport entre les plus fortes et les plus faibles productions d'énergie est de l'ordre de huit.

Nous reviendrons en détail sur l'influence énergétique de ces diverses

FRANCE ET ILES ANGLO-NORMANDES



N°	DÉSIGNATION	N°	DÉSIGNATION	N°	DÉSIGNATION
1	Boulogne	15	Carteret	29	Plougrescant Ent.
2	Saint-Valéry	16	Senéquet	30	Treguier
3	Le Hourdel	17	Granville	31	Ploumanach
4	Cayeux	18	Ile Chausey	32	Trebeurden
5	Le Tréport	19	Cancale	33	Anse de Primel
6	Dieppe	20	S ^t Malo	34	Ent. Château du Taureau
7	S ^t Valéry-en-Caux	21	Les Minquiers	35	Roscoff
8	Fécamp	22	Saint-Cast	36	Aberwrach (Fort Cezou)
9	Le Havre	23	Erquy	37	Aberbenoit
10	Quillebeuf (1 ^{ère} P.M.)	24	Portrieux	38	Porsal
11	Caudebec (1 ^{ère} P.M.)	25	Paimpol	39	Baie de Lampaul
12	Courcy	26	Ile de Brénat-Port-Dos	40	Jersey S ^t -Helier
13	Dielette	27	Les Heaux-de-Bréat	41	Guernesey (S ^t Pierre)
14	Les Ecrehou	28	Lezardrieux		

Fig. 3 Index II

propriétés, mais auparavant, il convient d'évoquer l'extrême diversité des marées aux divers points du monde. Le type habituel sur les côtes françaises (deux marées par jour, d'amplitudes presque égales) n'est pas général, et l'Indochine, par exemple, connaît des marées de tous les autres types, et en particulier des marées d'une période voisine de 24 heures.

Ce point est souvent oublié dans les études d'énergie marémotrice, sans



N°	PAYS	LIEUX
1	TERRE DE BAFFIN	Détroit de Davis (Baie Fosbinder)
2	CANADA	Baie Ungava - Riv. Koksak (entrée)
3	CANADA (Nouvelle Ecosse)	Baie de Fundy Annapolis Basin
4	d°	Minas Basin
5	CANADA (Nouveau Brunswick)	St. John
6	BRÉSIL	Ile Maraca
7	RÉPUBLIQUE ARGENTINE	San Antonio
8	d°	Golfe San José
9	d°	Puerto San Julian
10	d°	Puerto Santa Cruz
11	d°	Puerto Gallegos
12	d°	Cap Virgenes
13	MEXIQUE	Entrée du Rio Colorado
14	ALASKA	Knik Arm : Anchorage

Fig. 3 Index III

doute parce que les projets étudiés jusqu'ici (Angleterre, Etats-Unis, France) se trouvent sur les côtes de l'Atlantique où prédomine le type à deux marées par jour.

Si nous nous bornons maintenant à un examen rapide des marées du monde civilisé nous en retiendrons, pour l'Europe d'abord, que la marée est

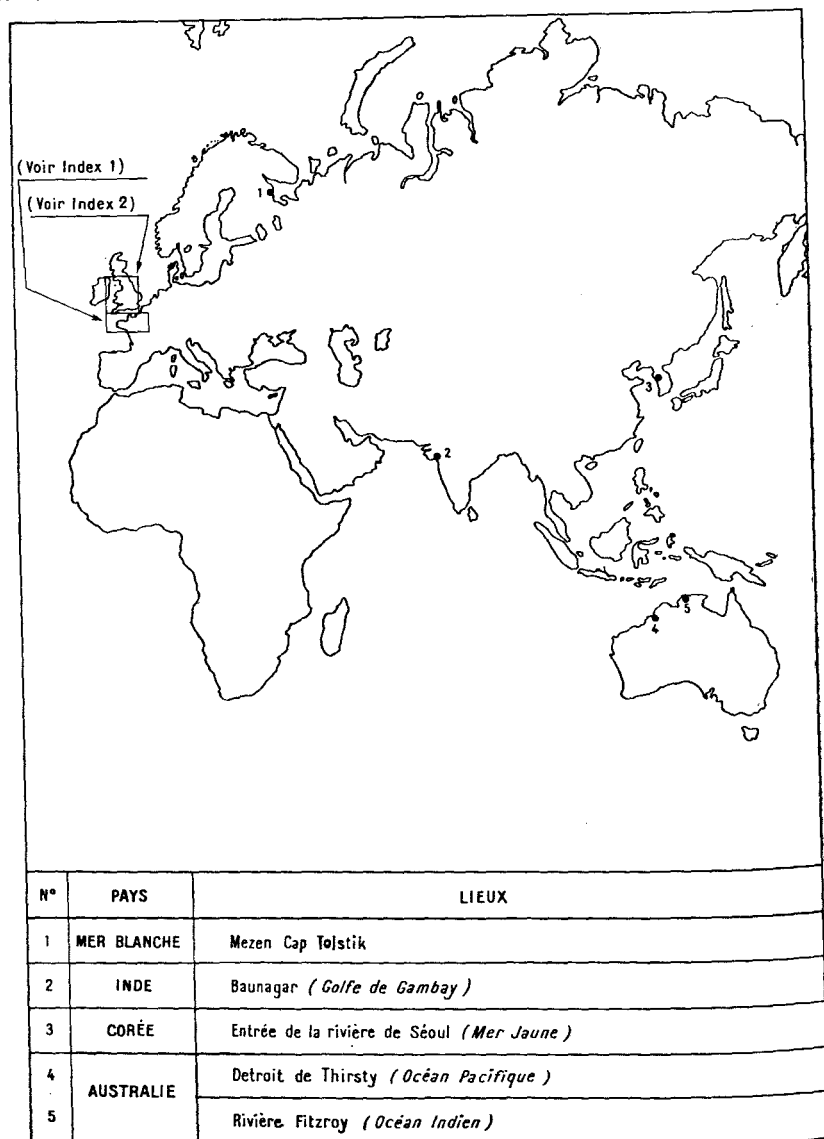


Fig. 3 Index IV

négligeable en Méditerranée (quelques décimètres d'amplitude), importante sur l'Atlantique ou les côtes anglaises de la Manche, maximum sur les côtes françaises de la Manche. Très rares sont les points du monde civilisé où l'amplitude dépasse huit ou dix mètres: on peut citer, en Angleterre, l'estuaire de la Severn et au Canada le bassin des Mines dans le fond de la baie de Fundy, les amplitudes y sont un peu supérieures à celles des marées de la baie du Mont Saint-Michel. La France est certainement le pays le plus favorisé du monde en énergie des marées et elle peut légitimement espérer en tirer une énergie annuelle de l'ordre de celle que fournit, sous forme de charbon, le bassin houiller du Nord et du Pas-de-Calais, soit plusieurs dizaines de milliards de kilowattheures (fig. 3 index 1, 2, 3, 4).

C. Cycles d'utilisation

Les régimes de remplissage et de vidage des bassins au travers des turbines ont fait l'objet de très nombreuses recherches et propositions avant les études actuelles. Beaucoup d'entre elles ont perdu leur intérêt, et nous allons nous borner à examiner les cycles les plus intéressants.

Simple effet — Le plus simple utilise un seul bassin créé par un barrage fermant l'estuaire ou la baie. L'énergie potentielle de l'eau est utilisée lorsque le bassin se vide, c'est le cycle à simple effet au vidage (fig. 4).

Trois phases dans le fonctionnement:

- a) Une phase de **remplissage**, turbines arrêtées et vannes ouvertes: à marée montante, l'eau s'introduit dans le bassin à travers les vannes;
- b) Une phase d'**attente**, turbines arrêtées et vannes fermées, la mer baisse, le niveau du bassin ne bouge pas, on attend le moment le plus favorable pour commencer à produire l'énergie, ce sera par exemple celui qui donne la production maximum si tous les kWh ont la même valeur;
- c) Une phase de **production**, turbines en marche et vannes fermées: les turbines produisent de l'énergie sous la hauteur de chute créée par la différence de niveau entre le bassin et la mer.

Au moment du fonctionnement des turbines, la chute est toujours de même sens, du bassin vers la mer, et, pour un équipement normal, les mouvements d'eau ne sont jamais plus rapides qu'avant la construction de l'usine à peu près de même vitesse à la montée, plus lents à la descente.

Nous trouvons un fonctionnement analogue si les turbines marchent lorsque le bassin se remplit, (cycle à simple effet au remplissage). Mais les rives des estuaires ne sont ni surplombantes ni verticales; les volumes d'eau, pour une même différence de niveaux, sont plus importants, pour la tranche supérieure de la retenue que pour la tranche inférieure, le cycle au remplissage donnera donc moins d'énergie que le cycle au vidage. Par exemple, pour la Rance, le rapport est d'environ deux tiers. Il sera nettement meilleur pour un projet comme Chausey utilisant une grande baie.

Double effet — On a naturellement songé, dès le début des études, à combiner les deux effets dans un cycle à double effet (fig. 5). La production d'énergie a lieu pendant le remplissage et pendant le vidage. Avec un seul barrage (dessin de gauche de la figure 5), la chute pendant la phase de production d'énergie est tantôt de la mer vers le bassin et tantôt du bassin vers la mer. Il pourrait

donc paraître nécessaire, dans ce cas, d'étudier une distribution spéciale des canaux d'amenée et d'évacuation d'eau à l'intérieur du barrage, de façon à conserver le même sens d'écoulement de l'eau à travers la turbine. On peut aussi songer à d'autres dispositions (dessin de droite de la figure 5). Mais les turbines modernes permettent d'éviter toutes complications et d'adopter des schémas très simples. Il n'y a pas à priori à faire un choix entre ces deux cycles et les innombrables cycles mis en évidence. Chacun d'eux, au long des années, conviendra à son tour.

CYCLE A SIMPLE EFFET A LA VIDANGE

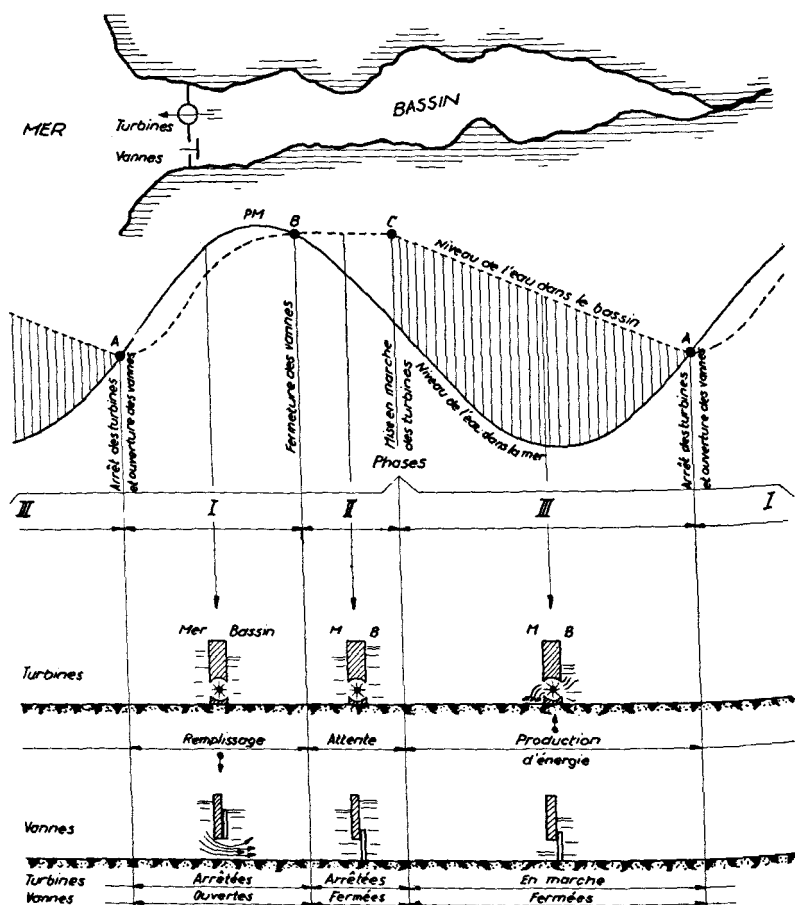


Fig. 4

Toutes les autres idées mises en avant utilisant les bassins associés ou conjugués conduisent à des dispositifs très compliqués et onéreux en raison principalement des travaux de génie civil ou de l'importance des vannes et sont, en fait, inutiles en France en raison de l'interconnexion pratiquement parfaite des divers réseaux électriques.

Par contre, un procédé particulièrement intéressant d'amélioration du rendement de ces cycles consiste à faire fonctionner les turbines en pompe au moment des étales supérieures et inférieures.

CYCLE A DOUBLE EFFET

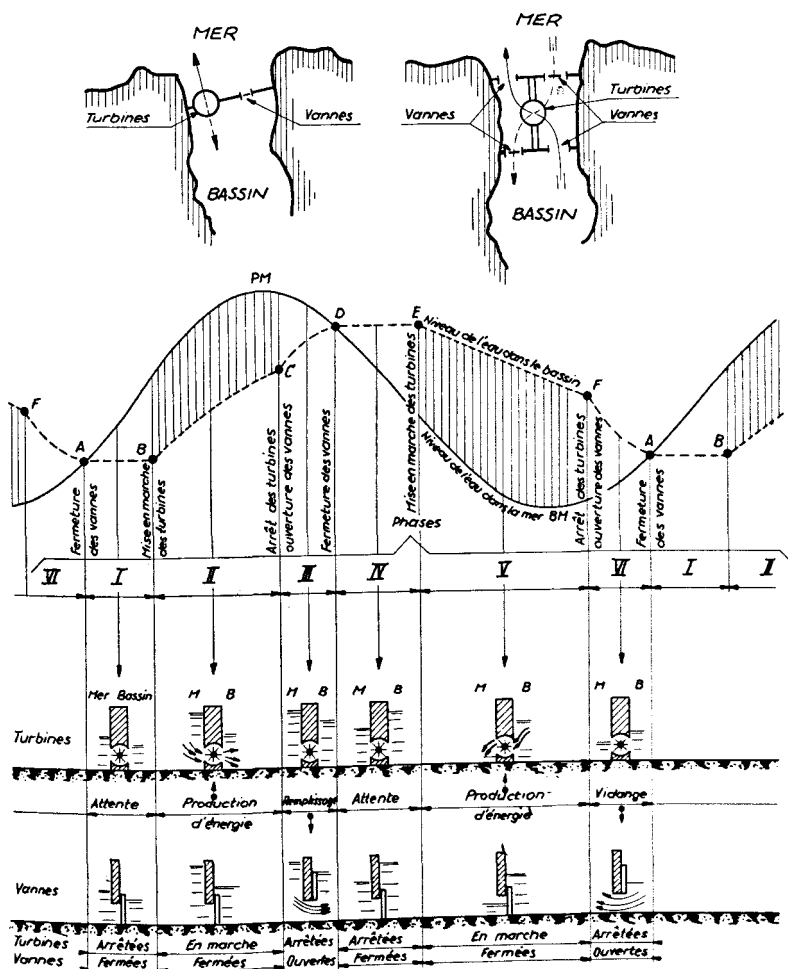


Fig. 5

Les recherches modernes retiendront donc les trois idées de simple effet, double effet et pompage pour les combiner dans une richesse pratiquement infinie de combinaisons diverses.

Tous les cycles d'utilisation précédente avaient une période égale à la durée d'une marée. La généralisation nécessaire du problème nous a conduit à des résultats très inattendus. Mais avant de les exposer, nous préciserons que les équations définissant le fonctionnement optimum lors d'un vidage ou d'un remplissage (turbine ou pompage) datent de la création de la Société d'Etudes pour l'Utilisation des Marées (1943). Une de nos premières tâches a été de les établir au moyen du Calcul des Variations, d'en fixer les propriétés les plus importantes et de mettre au point l'utilisation pratique de ces calculs. Il s'agissait là de recherches mathématiques assez étendues ayant leur intérêt propre, mais sur lesquelles nous n'insisterons pas, renvoyant le lecteur, s'il en est curieux, à un article du Bulletin de la Société Française des Electriciens (numéro de mai 1953), un rapport au Congrès de l'Energie des Mers (Paris — Juin 1956) et divers articles.

Une marée comporte quatre mouvements possibles, deux turbinages, deux pompages; il y aura donc à priori, pour l'exploitation d'une marée, seize combinaisons possibles représentant chacune un cycle possible. Ce cas très simple d'une période égale à la durée d'une seule marée, est assez bien adapté à l'étude de la production d'une énergie de valeur constante dans un monde fictif où le prix de l'énergie serait indépendant de l'heure et de la saison. Le cas de deux marées, d'une durée un peu supérieure à 24 heures, déjà plus difficile, permet d'aborder et de comprendre le cas essentiel du prix de l'énergie variable avec l'heure, suivant la distinction habituelle des heures pleines, heures de pointe et heures creuses, cas négligé par les premiers chercheurs qui semblent s'être tous fixé pour objectif la continuité de la production.

Mais le cas de 27 marées (quatorze jours) est seul à bien correspondre à peu près au problème réel tel que le pose la structure actuelle du marché de l'énergie électrique, car il permet d'introduire les heures creuses du samedi et dimanche. Le raisonnement est aisé: chaque marée introduit quatre mouvements. Pour une marée, le nombre des cycles possibles à priori est égal au nombre des combinaisons de ces quatre mouvements entre eux, soit $2^4 = 16$. Pour deux marées, il sera de $(16)^2 = 256$ cycles, ce qui nécessite déjà un certain effort pour les classer convenablement. Pour 27 marées, il atteindra $16^{27} = 2^{108}$ cycles différents, soit environ $3,10^{32(1)}$. Il n'y a donc aucun espoir de les recenser. Mais l'étude complète des cycles à deux marées, et l'esquisse de celui des trois marées ont permis d'apporter les notions fondamentales nécessaires pour une exploitation correcte et suffisent à montrer l'extrême richesse du sujet en mettant en évidence la vraie nature de la souplesse extraordinaire d'une usine marémotrice. On comprend bien l'introduction successive des cycles du premier ordre, relatifs à des variations de prix ayant la période d'une marée, puis de ceux du deuxième ordre pour une période de deux marées, voisine de la journée, etc. . . .

¹⁾ Trois cent mille milliards de milliards de milliards.

a) Cycles du premier ordre (une marée):

Ce sont les 16 cycles ayant une marée comme périodicité. Nous noterons a le pompage direct, b le pompage inversé, 1 le turbinage direct, 2 le turbinage inversé, de telle sorte que le double effet, double pompage représenté sur la figure 6 aura comme notation alb2. Par suite de la périodicité indiquée, la suite des mouvements sera:

$$alb2 \quad alb2 \quad alb2 \dots\dots\dots$$

les points de début et de fin de cycle étant à la même cote.

Le tableau ci-dessous montre clairement la formation de ces 16 cycles.

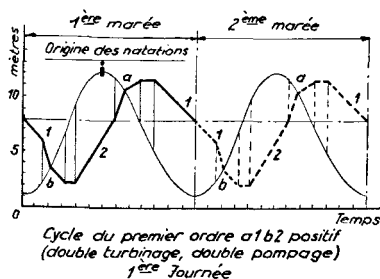


Fig. 6

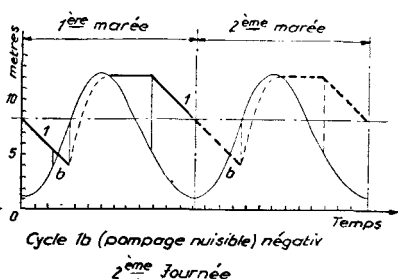


Fig. 7

Tableau I.

	Pas de pompage	Pompage direct	Pompage inversé	Deux pompages
Pas de turbinage.	z	a	b	ab
Un vidage	1	a1	1b	a1b
Un remplissage ..	2	a2	b2	ab2
Deux turbinages.	12	a12	1b2	a1b2

Le cycle sans mouvement z, que nous appellerons «zéro», correspond au cas où les usines hydrauliques déversent et où le prix de l'énergie est par suite nul pendant toute la marée.

Certains cycles, comme 1b (fig. 7), paraissent à écarter comme conduisant à un pompage nuisible, puisqu'il abaisse le bassin au moment où il convient à d'ouvrir les vannes, afin de préparer le nouveau simple effet au vidage. De ce fait, il consomme de l'énergie pour un résultat défavorable.

Mais dans l'ère atomique il sera peut-être intéressant pour éviter d'arrêter un réacteur nucléaire et son empoisonnement par le Xénon 135, de consommer de l'énergie. En effet, la prépondérance atomique sera telle, peut-être, que l'arrêt de nuit de toutes les hydrauliques et des marémotrices ne suffira pas à laisser une charge suffisante aux usines atomiques.

Dans ce cas, il pourra s'avérer intéressant de payer une petite somme pour consommer de l'énergie, et la marche en pompe des marémotrices, de coût presque négligeable, sera sans doute préférable à l'installation de résistances liquides ou à la création artificielle de consommations. Des cycles comme 1b auront donc peut-être plus tard un intérêt.

Mais revenons à la conjoncture actuelle. Nous appellerons cycles positifs ceux qui répondent au cas où l'énergie produite n'a jamais une valeur négative. Nous trouvons immédiatement huit cycles positifs, le cycle (z) étant mis à part.

quatre «simple effet»	{	deux sans pompage (1) (vidage) (2) (remplissage)
		deux avec un pompage (a1) (b2)
quatre «double effet»	{	un sans pompage (12)
		deux avec un pompage (a12) (1b2)
		un avec deux pompages (a1b2)

la détermination des cycles utiles, pour l'exploitation d'une seule marée, est ainsi complète.

b) Cycles du deuxième ordre (deux marées):

Ici le prix de l'énergie sera constant ou périodique, ce qui est acceptable, si l'on substitue au jour civil de 24 heures, une période égale à la durée de deux marées, ce qui représente une approximation assez grossière; la durée de deux marées successives varie en effet entre 24 h. 30 et 25 h.20, d'où un écart atteignant plusieurs heures après quelques jours. Mais l'analyse de ce cas est nécessaire pour saisir le mécanisme de formation des cycles d'ordres supérieurs.

Dès le deuxième ordre, la richesse en cycles est déjà étonnante: quatre fonctionnements en producteurs d'énergie sont possibles: deux en vidage du bassin (appelés 1 et 3), deux en remplissage (appelés 2 et 4); quatre fonctionnements en consommateurs d'énergie (pompage), sont possibles: deux en remplissage du bassin (appelés a et b), deux en vidage (appelés c et d).

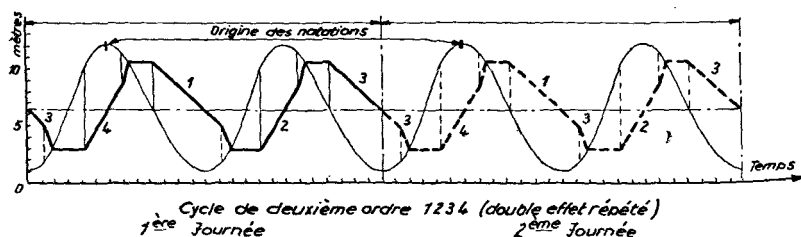


Fig. 8

Premier exemple (fig. 8). — Un double effet répété à chacune des deux marées s'appellera 1 2 3 4 (cycle positif), la numérotation 1 désignant le premier vidage possible après la première pleine mer de la première marée. Nous représenterons sur la fig. 8 deux journées (quatre marées successives), pour bien mettre en évidence le caractère cyclique, caractérisé par le fait qu'à haute mer, le niveau du bassin est le même toutes les deux marées.

Deuxième exemple. — Un simple effet à deux pompages s'appelant a1c sera représenté par la fig. 9 (cycle positif).

Il peut, en effet, y avoir des combinaisons de hauteur de pleine mer et de prix d'énergie rendant intéressant de pomper aux deux pleines mers successives c et a avant de faire l'unique vidage 1. Ce sera, par exemple, le cas où l'énergie de nuit et du matin ne vaudrait pratiquement rien et où celle de l'après-midi serait précieuse.

A priori, le nombre de cycles différents du second ordre est de $2^8 = 256$, nombre des combinaisons possibles des huit mouvements (1, 2, 3, 4, a, b, c, d). 104 seulement sont des cycles positifs ce qui représente déjà un beau choix, bien éloigné de la classique opposition entre simple et double effet.

Les 256 cycles possibles se classent, en effet, rapidement suivant le nombre de mouvements consommateurs (zéro, un, deux, trois ou quatre pompages) et suivant le nombre de mouvements producteurs (zéro, un, deux, trois ou

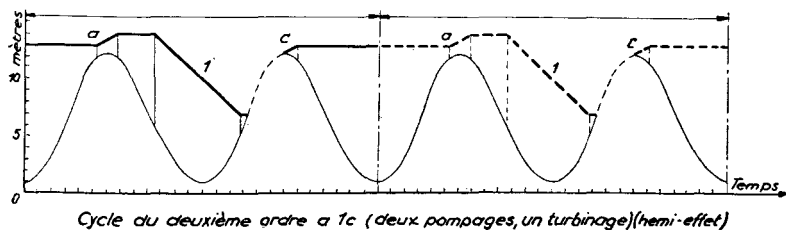


Fig. 9

quatre turbinages). En fait, il est très utile de séparer en deux la place des deux turbinages suivant qu'il s'agit de deux mouvements de même sens ou de deux mouvements de sens opposés: dans un cas, on répète à chaque marée le même mouvement, d'où le nom de simple effet répété 13 (fig. 10) produit de deux cycles de premier ordre, dans l'autre cas on ne fait pas de turbinage pendant toute une marée double effet unique 12 (fig. 11) cycle du premier ordre suivi ou précédé d'un repos.

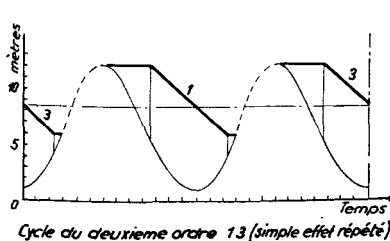


Fig. 10

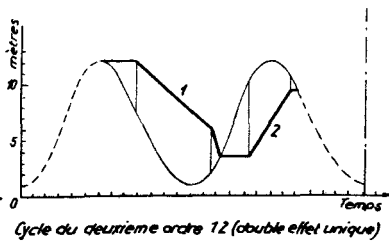


Fig. 11

Les cycles à un seul mouvement porteront évidemment le nom de simple effet unique, ceux à quatre, de double effet répété. Restent ceux à trois mouvements, inconnus autrefois, traduisant le fait qu'il est souvent inutile et même coûteux de turbiner la nuit. Nous leur avons donné le nom de sesqui-effet 124 (fig. 12) (sesqui signifiant $3/2$) définissant ainsi un cycle intermédiaire entre les simple et double effets. Le nom de «hemi-effet» (hemi signifiant $1/2$ correspondant à un cycle à un seul mouvement du type alc (fig. 9).

c) Conclusion:

On ne peut songer à aller beaucoup plus loin ici dans l'analyse. La période de trois marées entraîne $2^{12} = 4096$ cycles différents et nous avons démontré

qu'il y en a exactement 1136 positifs. Or chaque cycle peut être optimum pour une certaine variation du prix de l'énergie pendant ce cycle. Un dispatcher chargé de préparer le programme d'une quinzaine de quatorze jours ne saurait raisonnablement y passer plus d'un après-midi, par exemple, il devra donc se contenter de son intuition convenablement éduquée. Il devra bien connaître la solution du problème à deux marées, grâce aux 104 cycles positifs du second ordre. Il pourra lui être utile aussi de considérer les 34 cycles représentant, d'après une théorie que nous n'exposerons pas ici, des cycles appelés par nous cycles en attente, parce que, bien qu'ils ne soient pas positifs pour le deuxième

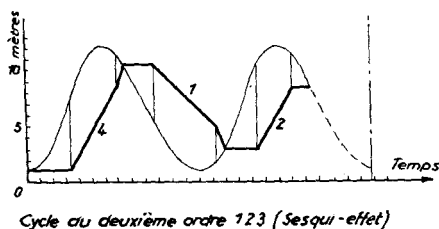


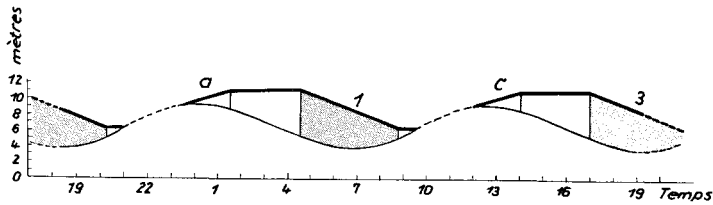
Fig. 12

ordre, du fait qu'ils ne comportent pas de contradictions internes, ils peuvent pour un allongement convenable de la période engendrer des cycles positifs d'ordre supérieur. Ils seront donc intéressants pour un dispatcher qui cherche à étudier une quinzaine, et pour le moment il devra en rester là, la complication du troisième ordre devenant déjà excessive, bien que nous ayons pu faire l'étude complète de détail et que par suite la théorie générale des cycles d'ordre quelconque soit maintenant connue.

La solution du problème à deux marées dans le cas du prix constant est évidemment particulièrement intéressante, car elle équivaut à la recherche de la production maximum d'énergie. Sa forme dépendra du coefficient de la marée. Les figures 13 à 16 montrent que pour les faibles marées (coefficient 45) on obtient un simple effet répété à la vidange avec pompage alc3 :

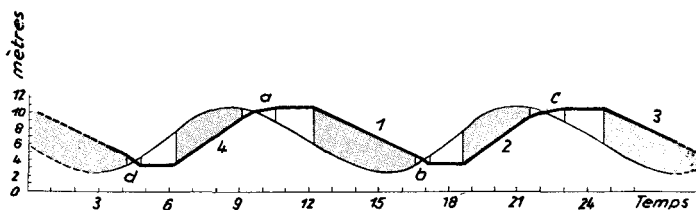
- Pour les marées moyennes (coefficient 70), un double effet répété avec quatre pompages alb2c3d4.
- Pour les fortes marées (coefficient 95), un sesqui-effet à deux pompages alb23.
- Pour les marées exceptionnelles (coefficient 120), un double effet sans pompage 1234.

On peut aussi vouloir exploiter en pointe de manière à répondre mieux en hiver aux exigences de la consommation, par exemple, la figure 17 montre comment on peut arriver à obtenir la puissance maximum de chaque groupe (ici 7.000 kW) pendant les huit heures de pointe des deux journées considérées (8 h — 10 h et 17 h — 19 h) bien que ces jours là les marées soient les plus faibles sur quatre années successives. (Notre notation sera ici alc3) (simple effet répété avec double pompage). Le niveau du bassin reste ainsi continuellement au dessus de celui de la mer. Cet exemple suffira à montrer comment on peut arriver à utiliser pleinement la souplesse extrême des marémotrices.



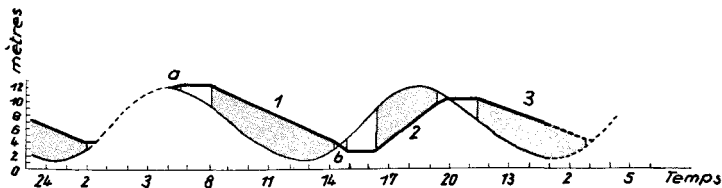
*Cycle à production maximum, coefficient 45 (a1 c3)
(simple effet répété, double pompage au remplissage)*

Fig. 13



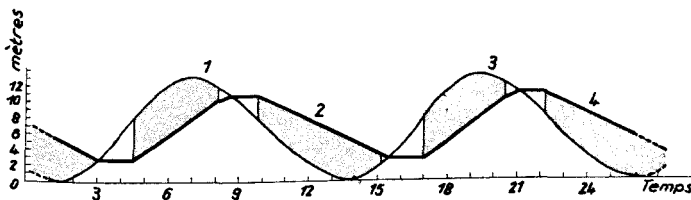
*Coefficient 70 (a1 b2 c3 d4)
(double effet répété à quatre pompages)*

Fig. 14



Coefficient 95 (a1 b23) (sesqui-effet à deux pompages)

Fig. 15



Coefficient 120 (1234) (double effet sans pompage)

Fig. 16

Il est maintenant bien clair que l'on peut s'affranchir totalement du rythme lunaire des marées et produire efficacement les puissances demandées suivant le rythme solaire des besoins à condition de pouvoir construire des machines assurant économiquement les six fonctionnements suivants:

- 1° Turbinage direct — La mer est plus basse que la retenue créée par le barrage.
- 2° Turbinage inversé — La mer est plus haute.
- 3° Pompage direct — Les machines fonctionnant en pompe, l'alternateur devenant moteur synchrone, prennent de l'eau dans la mer pour élever le niveau de la retenue.
- 4° Pompage inversé — La définition va de soi.
- 5° et 6° Pertuis direct et inversé — Les groupes arrêtés permettent la traversée dans un sens ou dans l'autre de grandes quantités d'eau afin d'accélérer les passages d'un des fonctionnements précédents à l'autre.

Grâce à ces six fonctionnements, il est possible, suivant la capacité du réseau de fournir ou de recevoir, et suivant les besoins de la consommation, de garantir de la puissance pendant les heures de pointe ou de concentrer l'énergie en hiver pendant les heures ouvrables, ou de produire l'énergie dans le seul but d'économiser le maximum de charbon dans les centrales thermiques ou encore de consommer pour pomper, en régularisant la consommation de nuit par exemple. L'énergie marémotrice se montre alors d'une souplesse extraordinaire grâce à l'extrême variété des cycles alors permis. Elle s'adapte aisément à toutes les situations et en particulier aux bouleversements du marché de l'énergie électrique qui découleront peut-être de l'introduction d'énergie atomique ou solaire.

Toute cette révolution dans l'utilisation de l'énergie marémotrice a donc dépendu en fait de la possibilité de construire des turbo-machines ayant de larges possibilités dans ces six fonctionnements.

Nous avons exposé en collaboration avec M. AUROY. F. et M. KAMMER-LOCHER comment après de nombreuses études les groupes «bulbe amont» à axe horizontal ont été choisis, au début 1955, pour l'usine marémotrice de la Rance, leur intérêt réside essentiellement (en dehors d'une légère amélioration de rendement de quelque pour cent dans le sens du turbinage direct — vidage —):

1° — Dans la possibilité, sans dépenses supplémentaires importantes, de fonctionner avec des rendements convenables dans toutes les hypothèses possibles: remplissage ou vidage, en turbinage ou en pompage;

2° — Dans la possibilité d'installer, avec une rentabilité marginale suffisante, dans la largeur de la Rance, une puissance nettement plus élevée qu'avec des groupes classiques, ce qui conduit à aller jusqu'à 38 groupes de diamètre 5,65 m, permettant de plus le logement dans le corps du barrage des ateliers, transformateurs, poste haute tension, etc...

3° — Dans le grand débit de vannage offert par les groupes eux-mêmes (186 m³/sec sous un m. de chute pour un groupe bulbe).

Leur mise au point s'est poursuivie tout au long des années 1956 et 57 et l'année 1958 verra l'installation provisoire du premier groupe Rance dans une écluse de St-Malo spécialement équipée pour ce but. Les solutions adoptées pour les divers problèmes, la corrosion en particulier, pourront être ainsi essayées en vraie grandeur et «in situ».

D. Usine de la Rance

Au cours de l'année 1954 après de nombreux avant-projets, un projet dit «projet 1955» a été étudié, puis finalement adopté. Il comporte une digue-usine dont le profil approximatif est indiqué sommairement (fig. 18), qui mesure environ 700 mètres de longueur et dont la construction exigera 460.000 m³ de béton. Sur la rive gauche, une écluse assurera la navigation entre la mer et l'estuaire. L'usine aura la forme d'un tunnel dont la partie supérieure est à la cote +15, les plus hautes eaux pouvant atteindre le niveau +13,5. Tout le matériel de production, de transformation, d'évacuation de l'énergie et d'exploitation doit être installé à l'intérieur de la digue-usine. L'équipement comprendra :

- 38 groupes-bulbes de 9.000 kW, tournant à 88,2 t/m, dont l'énergie sera débitée sur le réseau général à 220 KV ;
- 10 puits de vanne aidant aux différents remplissages et vidages de l'estuaire, nécessaires pour l'exploitation.

Les plages de montage et d'entretien des groupes ainsi que les ateliers seront installés dans le corps du barrage, à chaque extrémité, au-dessus de la zone équipée par les puits.

La conception monobloc des groupes permet, on le voit, un ensemble de construction simple et sûr ; le remplacement des groupes à réviser se fera par simple levage à travers une fosse, un groupe de rechange prenant en quelques heures la place du précédent.

Sur la base économique de 1954, les dépenses d'établissement ont été évaluées à 32 milliards environ.

L'appel d'offres ayant été lancé fin juillet 1955, l'entreprise choisie en 1956, les travaux définitifs pourront être échelonnés de 1958 à 1963, et l'on prévoit, pour l'hiver 1963, la mise en service du dernier des 38 groupes.

Ce projet conduit à une puissance installée nominale de 342.000 kW, et à une productivité annuelle de plus de 800 millions de kWh, équivalente à l'économie de charbon que pourrait apporter une usine au fil de l'eau, genre Rhin ou Rhône, de un milliard de kWh environ. Une évaluation précise doit cependant utiliser des notions plus approfondies que nous allons présenter maintenant.

E. Valeur économique d'une usine type Rance

Une usine marémotrice du type Rance a une production discontinue et ne se conçoit qu'en fonction de son intégration dans l'ensemble de la production française d'énergie électrique, ce qui ne présente d'ailleurs aucune difficulté technique étant donné le développement considérable de l'interconnexion des divers réseaux électriques. De ce fait le problème de la vente d'une énergie intermittente prend un jour entièrement nouveau, seule comptant la contribution d'une telle usine aux problèmes du réseau.

En effet, le problème posé est de pouvoir satisfaire à une date donnée une consommation prévue d'énergie électrique dans les meilleures conditions possibles. Or la consommation varie du simple au triple d'heure en heure suivant l'heure ou le mois, par suite des habitudes des hommes, et pour la définir il conviendrait de donner pour chacun des instants d'une année donnée

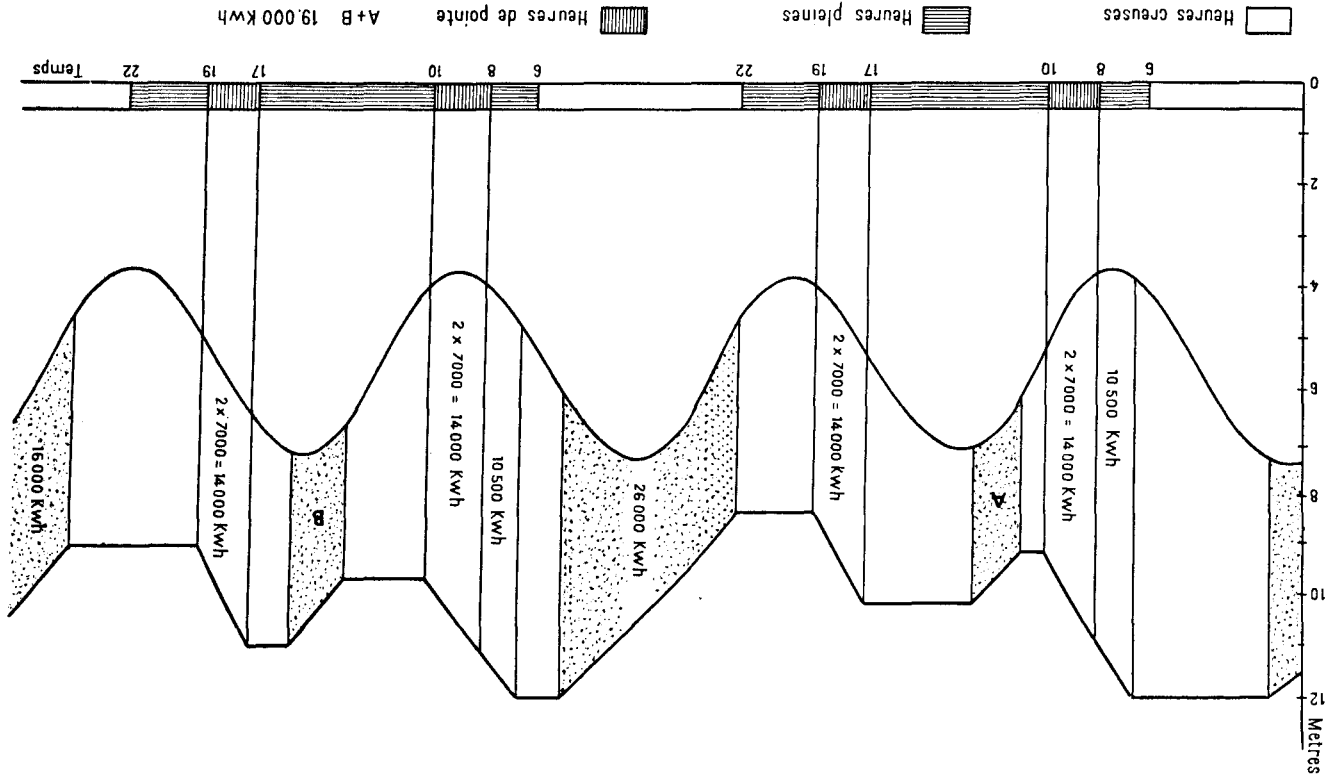


Fig. 17

la puissance appelée. Les contrats commerciaux eux-mêmes la fixent par quart d'heure, d'où près de quarante mille chiffres. Fort heureusement, l'expérience a montré dans l'état actuel que trois grandeurs permettent de serrer de très près le problème, l'énergie annuelle en GWh (millions de kilowatts-heures) et mesurée dans le cas de la France par l'économie de charbon apportée, la puissance de pointe en MW (mégawatts ou milliers de kilowatts)

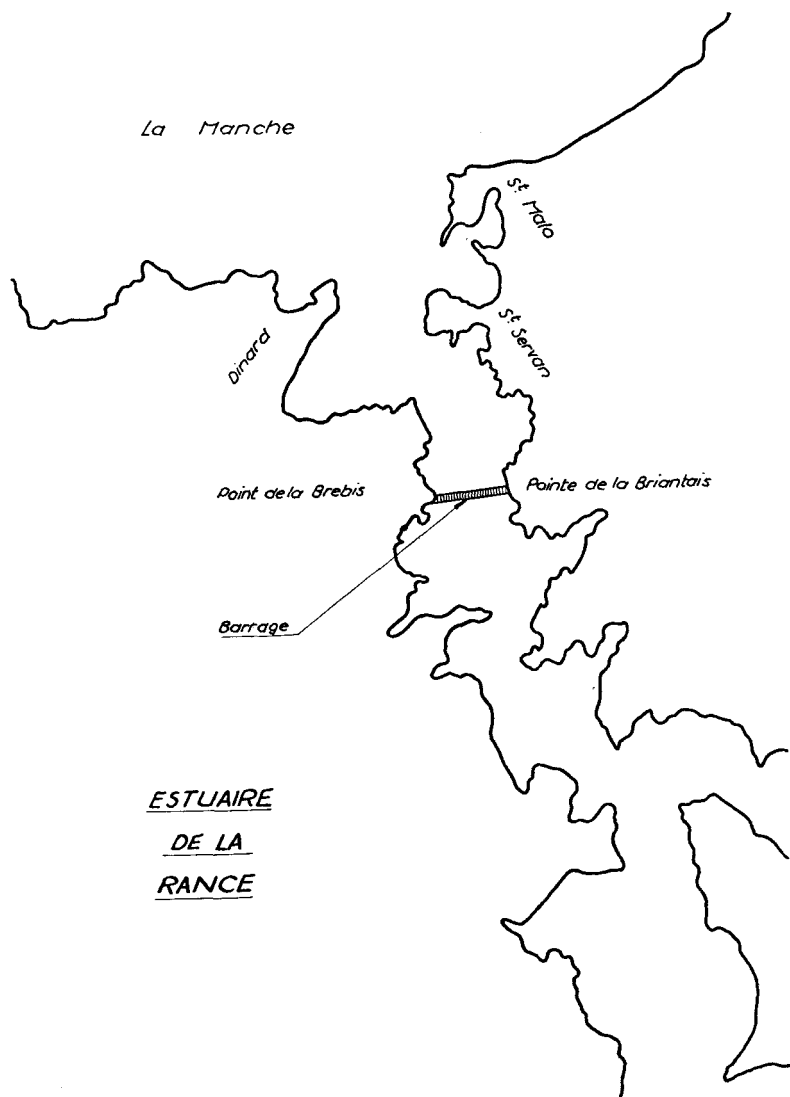


Fig. 18

définie comme la moyenne horaire des consommations appelées pendant les heures de pointe (quatre heures par jour) des jours ouvrables d'hiver, et la **puissance garantie**, aussi en MW, définie comme la moyenne horaire des consommations pendant les heures pleines des mêmes jours ouvrables d'hiver.

Satisfaire à la consommation, c'est pouvoir répondre aux trois conditions, c'est-à-dire pouvoir produire **au moins** l'énergie annuelle demandée, **au moins** chacune des puissances de pointe ou garantie. Chaque usine fournira sa contribution à chacun des trois facteurs et seule comptera la dépense totale pour la construction de toutes celles prévues au plan y compris la capitalisation suivant un taux convenu des charges d'exploitation.

Début mai 1955, on pensait pouvoir réaliser avec l'usine de la Rance, en chiffres nets, toutes pertes à la production déduites, en garantie 140 MW, en pointe 282 MW, énergie annuelle 850 GWh. Il faut bien voir que chacune de ces valeurs correspond à des situations différentes de l'équilibre du réseau français entre production et consommation. Il sera demandé par le dispatching certains hivers de fonctionner en rendant la pointe maximum, un autre hiver ce sera le tour de la puissance de garantie. Le plus souvent en fait, même en hiver, nous pensons que l'exploitation sera en économie de charbon.

Chacune des valeurs indiquées plus haut correspond en effet à un de ces trois types d'exploitation annuelle défini plus complètement comme suit :

exploitation annuelle en économie de charbon	}	garantie 87 MW	pointe 87 MW	économie 850 GWh
exploitation annuelle en pointe		garantie 70 MW	282 MW	de 770 GWh
exploitation annuelle en garantie		garantie 140 MW	140 MW charbon	770 GWh

L'économie de charbon moyenne à prendre en compte est donc comprise entre 770 et 850 GWh : en utilisant des coefficients de probabilité raisonnables, nous trouvons 820 GWh.

Ces données (pointe 282 MW, garantie 140 MW, économie de charbon 820 GWh) ont été utilisées dans la présentation en Mai 1955 du projet de la Rance aux Pouvoirs Publics, et ont justifié une décision de principe favorable. Mais elles ne peuvent être prises comme données définitives car elles sont très prudentes et il convenait qu'il en soit ainsi. L'histoire brève de ces modifications a un intérêt général : nous l'exposons donc ici :

- 1° — Nous n'avions pu encore, en mai 1955, faire exécuter des calculs suffisamment précis pour connaître l'économie de charbon apportée par une usine marémotrice, venant à peine de mettre au point des méthodes rigoureuses de calcul applicables à cette exploitation. Les chiffres précédents tenaient donc compte seulement, par prudence, d'une légère amélioration de quelques % sur une usine type au fil de l'eau. Or, la souplesse de l'exploitation de la Rance, compte tenu de l'extraordinaire diversité des cycles dont nous n'avons pu faire la théorie complète que vers cette époque, a donné des résultats très favorables, et les quelques % de supériorité de la Rance, introduits timidement dans nos premières estimations, devaient être portés à 20 % environ. D'une manière

précise, la Rance, exploitée de manière à obtenir dans les thermiques français l'économie maximum de charbon, apportera annuellement une économie égale à celle d'une usine pure au fil de l'eau, c'est-à-dire dont le débit serait constant toute l'année, produisant dans le même temps environ un milliard de kWh. La production annuelle moyenne en kWh de la Rance ne dépassera pas vraisemblablement 820 GWh, mais elle se placera fréquemment aux heures de la journée où l'économie de charbon par kWh est la plus grande, d'où un chiffre de 1000 GWh, étant bien compris que le GWh représente dans ce dernier nombre l'économie de charbon moyenne annuelle par GWh produit par une usine au fil de l'eau pure, c'est-à-dire incapable de faire des éclusées significatives. Grâce à cette notion, nous évitons d'avoir à tenir compte de la variation générale de la consommation calorifique des usines thermiques par suite de leurs progrès constants.

2° — Les études sur modèle réduit des turbines avaient déjà montré, depuis plusieurs mois, par rapport aux données de nos calculs primitifs, une amélioration importante des rendements en pompage ou en turbine inversée et notre chiffre d'énergie annuelle de mai 1955 en tenait déjà raisonnablement compte. Par contre on n'avait pu à cette date utiliser pleinement ces améliorations dans le calcul précis des fonctionnements en pointe ou en garantie; de ce fait, l'utilisation du remplissage pour la production de la puissance maximum en pointe par exemple, était souvent impossible par suite des forts débits exigés en turbine inversée avec les anciens rendements pour atteindre la puissance limite permise par l'alternateur. L'amélioration du rendement a donc comme conséquence, en sus de l'augmentation de la production, une amélioration très importante des possibilités de l'usine de la Rance en puissance de pointe. L'influence sur la garantie, moins importante, n'est cependant pas négligeable. Nous signalerons au passage que les problèmes technologiques de cavitation et la possibilité de retournement des pales jouent un rôle très important.

De ce fait, on considère aujourd'hui que l'usine de la Rance peut être raisonnablement caractérisée par les quatre données suivantes:

garantie	150 MW	pointe	320 MW
énergie annuelle	820 GWh	économie de charbon	1000 GWh

Ceci est obtenu, nous le rappelons, avec 38 groupes de 9 MW, soit 342 MW de puissance installée.

Indiquons enfin que dans nos études faites en collaboration avec M. MASSÉ nous appelons coût la dépense d'investissement augmentée des frais annuels d'exploitation capitalisés mais diminués de l'économie de charbon apportée par le fonctionnement de l'usine elle aussi capitalisée (le taux adopté a été de 8% comme l'avait fixé en 1955 le Commissariat français au plan). Nos études de 1955 ont donné par kilowatt de puissance garantie un coût de 79.000 francs contre 136.000 pour les usines thermiques ou 56.000 pour les usines hydrauliques au fil de l'eau (type Rhône ou Rhin). Il serait naturellement aujourd'hui nécessaire de réviser ces estimations, mais celles de 1955

restent en valeur relative suffisamment exactes pour permettre de fixer les domaines principaux d'utilisation d'une énergie marémotrice du genre Rance.

Une première application consistera à l'exploiter en pompant la nuit sous sa pleine puissance en utilisant la puissance inutilisée des centrales thermiques pour la restituer aux heures de pointe si cela en vaut la peine ou d'une manière plus générale moduler la production suivant les heures les plus favorables en vue de rendre maximum l'économie totale de charbon. De nombreux exemples ont pu être donnés dans de nombreuses publications mettant en évidence l'extrême richesse de ce sujet, un nombre de cycles différents dépassant l'entendement est maintenant nous l'avons vu à la disposition du dispatcher pour lui permettre de répondre à un problème constamment changeant. Cette souplesse de la production devant un programme toujours modifié est aujourd'hui le principal attrait de l'énergie marémotrice dans les pays fortement évolués. Mais cette opinion n'est pas encore acceptée par tous et sa discussion aussi large que possible demeure donc essentielle. Une autre raison de timidité réside nous l'avons dit dans l'arrivée de l'énergie nucléaire. Cette source nouvelle que l'on prévoit abondante et que l'on espère bon marché ne va-t-elle pas rendre inutiles toutes les autres sources et en particulier l'énergie marémotrice ? Tout fait prévoir que la source nucléaire ne sera pas la source unique, mais que ses propriétés énergétiques et économiques telles qu'on les devine aujourd'hui pourront être améliorées par la coopération des autres sources et particulièrement par les marémotrices. Un exemple très simplifié va préciser notre pensée. Supposons un pays disposant uniquement de centrales atomiques et de marémotrices le tout dans un réseau fortement interconnecté. Nous admettrons, ce qui dans une assez grande mesure devance largement les prévisions actuelles les plus optimistes pour les dix prochaines années, que les dépenses totales d'investissement et de combustibles soient égales pour l'énergie atomique et l'énergie thermique. Il est raisonnable aujourd'hui d'admettre qu'il y aura grand intérêt à exploiter l'énergie atomique le plus possible à puissance constante. Donc à 1 MW de puissance garantie correspondra pour une centrale atomique 1 MW de puissance de pointe et un coût de 136 millions de francs. Pour la marémotrice type Rance nous placerons en face de 1 MW de puissance garantie, 2,13 MW de puissance de pointe et 79 millions de francs de coût.

La solution d'un problème d'énergie dépend certes des sources disponibles de production mais aussi de la forme de la consommation à satisfaire et il ne faut jamais l'oublier. Prenons comme exemple le deuxième plan français fixé au début de l'année 1955: il vise à couvrir les besoins pour cinq années, nous en gardons par simplicité seulement deux caractéristiques la pointe (2307 MW) et la garantie (1692 MW). Avec l'atome seul il faudra construire à cause de la pointe 2307 MW de centrale et le coût total sera $2307 \times 136 = 315$ milliards de francs. Avec un mélange optimum de marémotrice et d'atome (on trouve aisément 634 MW de marémotrice et 1058 MW d'atome) on satisfera aussi aux deux conditions de garantie et de pointe mais le coût sera seulement de 194 milliards de francs. L'économie est frappante, le prix de revient (charbon du thermique équivalent en sus) étant réduit de plus d'un tiers. Par contre l'investissement seul (combustible exclu) sera 134 milliards dans le premier cas et 238 dans le second. Le prix de revient (charbon équivalent exclu) est

réduit du tiers et l'investissement est doublé, nous avons donc deux solutions s'opposant ainsi fortement.

L'exploitation de la centrale atomique et sa sécurité seront sans doute très facilitées par une marche beaucoup plus constante, les marémotrices suivant leur vocation faisant les pointes et remplissant les creux des programmes des centrales atomiques.

L'exemple précédent a seulement valeur d'explication et les méthodes plus complètes comme celles que nous avons publiées seul ou en collaboration avec M. MASSE permettent seules de décider des mélanges optima des diverses sources. Mais il montre une fois de plus la nécessité absolue, si l'on veut développer hors de France l'énergie marémotrice, de faciliter la discussion de ces nouvelles méthodes de raisonnement et ainsi de les préciser ou de les modifier suivant les divers cas particuliers.

F. Les projets autres que la Rance

L'examen en 1946 de tous les avant-projets français ou étrangers connus à ce moment par un Comité Technique Interministériel, avait conduit ce Comité à écarter tous les projets de petites usines offrant des superficies de l'ordre de 200 hectares et des énergies de 25 à 50 millions de kWh annuels, ces projets n'étant pas rentables et ne pouvant fournir qu'un appoint d'électricité négligeable sur le plan national. Il avait retenu, parmi les projets dont la réalisation lui a paru techniquement possible, deux projets types :

a) Usine de très grande production d'électricité appelée Chausey, située dans la baie du Mont Saint-Michel.

b) Usine d'importance moyenne installée dans la Rance.

En principe, un tel choix ne peut être fait de façon définitive qu'après comparaison de projets complets, mais les considérations suivantes, bien que très élémentaires, et en théorie très discutables, permettent de comprendre pourquoi les sites de la Rance et de Chausey sont particulièrement intéressants.

Il semble évident, d'abord, que, sous réserve d'un débouché bien ouvert sur la mer, et nous reviendrons plus loin sur ce sujet, les emplacements les plus favorables se trouvent dans les régions où l'amplitude de la marée est la plus forte, c'est-à-dire, en France, au voisinage de Saint-Malo. Des études plus détaillées le confirment : en supposant deux bassins identiques placés à hauteur, l'un de Saint-Malo, l'autre du Morbihan (unités de hauteur respectives : 5,70 mètres et 2,45 mètres), la dépense pour une même production augmente de 90% quand on passe du premier au second.

D'autre part, toutes choses étant égales par ailleurs, le prix de revient diminue quand la dimension du bassin grandit, car si la longueur du barrage double, la surface du bassin quadruple et, par suite aussi, l'énergie. Un raisonnement plus complet, quoique encore très simpliste, montre que, si on pouvait multiplier l'énergie de la Rance par dix en conservant la similitude des dimensions horizontales, le prix de revient du kWh tomberait à 55% de sa valeur ; si au contraire on divisait cette énergie par dix, le prix de revient du kWh serait multiplié par le coefficient 5,5. Il est donc avantageux, à égalité de forme, que le bassin soit très grand et situé sur une côte à fortes marées.

Il faut maintenant définir l'influence de la forme du bassin. D'une part, l'énergie utilisable dépendra de la façon dont les fonds découvrent plus ou moins à basse mer. D'autre part, le bassin se prêtera plus ou moins bien à l'établissement d'une usine; un facteur sera particulièrement significatif, à savoir la longueur du barrage qui le constituera.

Pour aller plus loin, nous introduirons la notion «d'énergie naturelle annuelle», ou d'énergie que produiraient en une année des machines de rendement unité fonctionnant en double effet, s'il était possible de concentrer chaque phase de turbinage au moment de chute maximum, c'est-à-dire pour chaque marée, de turbiner au vidage vers la mer à son niveau le plus bas, et de turbiner au remplissage à partir de la mer à son niveau le plus haut.

Nous ferons notre comparaison en utilisant cette notion, bien que certains emplacements puissent être plus appropriés à certains cycles que d'autres.

On peut, si on accepte des écarts de l'ordre de 10%, utiliser une formule très simple faisant intervenir deux éléments toujours connus pour chaque projet: à savoir la surface S du bassin pour les plus hautes eaux telle qu'elle est donnée par les cartes marines et l'amplitude A des marées de coefficient 100 qui est égale au double de l'unité de hauteur:

$$E = 0,7 SA^2$$

S en km^2 , A en mètres et E en millions de kWh/an .

Le tableau suivant donne dans ses quatre premières colonnes pour les principaux emplacements, les valeurs de A , S , E et L . Un des projets de la baie du Mont Saint-Michel conduit ainsi à une énergie naturelle annuelle de 66 milliards de kWh .

Reste maintenant à caractériser la facilité d'établissement d'un barrage, le premier critère, et d'ailleurs le plus simple, est évidemment la longueur de ce barrage, car les profondeurs d'eau à basse mer pour les emplacements de barrages étudiés diffèrent assez peu les uns des autres, au moins pour les estuaires.

Deux questions vont aider à définir l'influence de la forme:

1°) Le rapport $\frac{L}{S}$ caractérisera l'aptitude géographique d'un cycle à enfermer une grande surface d'eau, l'aptitude étant d'autant plus grande que le rapport est plus petit. La Rance, la baie du Mont Saint-Michel, la Rade de Brest, le site américain de Passamaquoddy, celui de Lorient se présentent de façon semblable, l'estuaire de la Severn est un peu moins favorable; par contre, un petit havre comme Rothéneuf paraît peu favorisé.

2°) Le rapport $\frac{L}{E}$ caractérise l'aptitude à la production d'énergie et fournit ainsi un classement sommaire des emplacements d'après leur intérêt économique, le plus grand intérêt correspondant évidemment au plus petit rapport. Or, parmi les stations françaises, l'estuaire de la Rance et la baie du Mont Saint-Michel se placent très nettement en tête, puis les projets de la rade de Brest, de la baie de la Somme, de l'estuaire de l'Aber Benoît viennent loin derrière, avec un coefficient près de quatre fois supérieur, les autres projets français, tels que celui des baies de l'Arguenon et de Lancieux, ceux de la baie de la Fresnaye, de Rothéneuf, de Lorient, de l'Aber Wrac'h, conduisent

à des longueurs de barrage par kWh de 7 à 10 fois supérieures à la longueur correspondante pour la Rance. Il est bien certain qu'un tel rapport $\frac{L}{E}$ n'a qu'une valeur d'indication et qu'un spécialiste ne saurait accepter sans appel un pareil jugement, mais les différences entre les divers emplacements sont si importantes qu'elles permettent de comprendre comment la question a été tranchée, et pourquoi.

Il devient évident que les petites usines, types Aber Wrac'h ou Rothéneuf, sont très défavorisées par l'exiguïté de leurs dimensions.

De même les projets étrangers de la Severn (Grande Bretagne) ou de Passamaquoddy (U.S.A.) paraissent moins intéressants que les deux premiers projets français, la longueur de barrage par kWh étant deux fois et demie supérieure à celle des projets français, un devis précis pouvant seul confirmer cette première impression.

Tableau résumant les éléments du choix d'un site

(L'énergie annuellement productible en pratique, avec un équipement suffisant, est un peu inférieure à la moitié de l'énergie naturelle).

Sites	A en m	S en km ²	E en gWh	L en m	$\frac{L}{S}$ en km ²	$\frac{L}{E}$ m/gWh
Lorient FRANCE	4,54	16	240	750	46	3,2
Brest "	6,42	92	2.640	3.640	40	1,4
Aber-Benoit "	7,40	2,9	110	200	69	1,8
Aber Wrac'h "	7,40	1,1	42	190	175	4,6
Arguenon et Lancieux .. "	11,40	28	2.520	6.275	227	2,49
La Fresnaye "	11,40	12	1.085	2.760	231	2,55
Rance "	11,40	22	2.010	725	33	0,36
Rothéneuf "	12	1,1	116	330	287	2,8
Chausey "	12,40	610	66.000	23.500	38	0,36
Somme "	9,30	49	2.940	5.100	105	1,7
SevernGRANDE BRETAGNE	11,50	44	4.020	3.500	80	0,87
Passamaquoddy .. U.S.A.	7,50	120	4.630	4.270	43	0,92

A Amplitude; S surface du bassin; E énergie naturelle.

Les différentes propositions et études faites en France sont très nombreuses (fig. 19), mais la plupart des projets datent des années 1919 à 1923. Rares sont, en effet, les projets récents, en dehors de ceux étudiés par Electricité de France, dont nous traiterons plus loin.

Voici ceux dont le principe avait paru digne d'être retenu dans un premier examen fait par la Société d'Etudes pour l'Utilisation des Marées (S.E.U.M.), en 1944.

a) La baie d'Arcachon a fait l'objet de propositions d'aménagement, l'une par usine et déversoir barrant la passe, l'autre par usine placée à cheval sur un pertuis artificiel creusé au travers de la langue de terre fermant la baie (M. Pillet 1902); et d'une très courte étude déposée par M. Joyeux en 1921.

b) la baie de La Rochelle et l'équipement du Marais Perdu contigu à cette baie, furent étudiés par M. Maynard, en 1919.

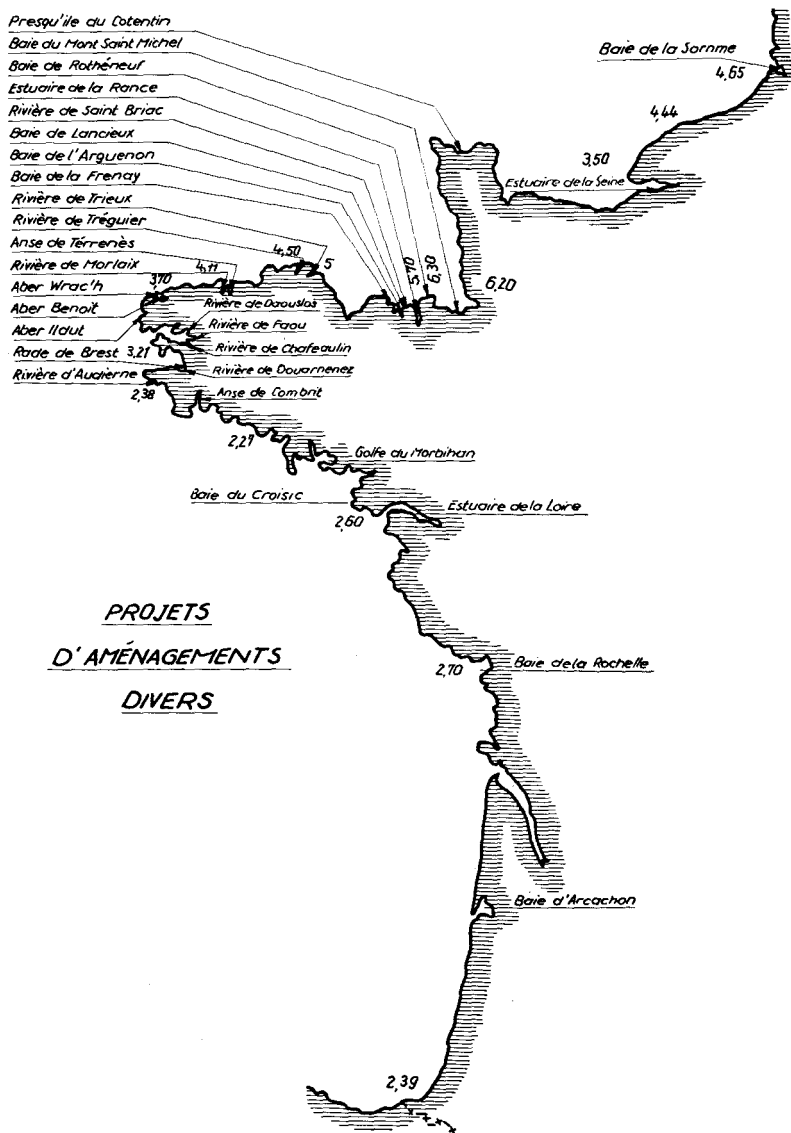
PROJETSD'AMÉNAGEMENTSDIVERS

Fig. 19

c) la possibilité d'un aménagement à l'embouchure de la Loire a été signalée à diverses reprises, notamment par M. Baudot, depuis octobre 1921.

d) la baie du Croisic a donné lieu à des études de cycles très poussées (MM. Chevrel et Laboureur).

e) le golfe du Morbihan, avec sa superficie de 72.000 hectares, parsemé d'îlots et en raison de l'étroitesse de son goulet, a suggéré de nombreux projets

d'aménagements, notamment ceux de M. Liébaux, de Juillet 1920 et d'octobre 1921, et, en 1942, de MM. Hubert et Marty.

f) les trois estuaires de la région côtière de la Manche située au nord de Brest, ont donné lieu à diverses propositions; celui de l'Aber Ildut a fait l'objet d'une demande de M. Vienne, en 1919; ceux de l'Aber Benoît et de l'Aber Wrac'h ont suscité de nombreuses études.

Le projet de l'Aber Wrac'h est le plus connu de tous les anciens projets d'usines marémotrices. Il fut choisi, en 1924, par les Pouvoirs Publics et fut l'objet d'un commencement d'exécution en 1928. Puis les travaux furent suspendus, et finalement arrêtés, en août 1930, faute de moyens financiers. En fait, la question n'était pas mûre, et les travaux prématurés.

Un dossier complet d'un nouveau projet fut présenté fin 1942 par l'Energie Industrielle et la Compagnie du Gaz Lebon.

g) les estuaires de Morlaix, anse de Terrenès, de Tréguier et du Trieux ont fait l'objet d'études diverses.

h) la baie de la Fresnaye a donné lieu à plusieurs avant-projets de MM. Vigour et Piketty, en 1911 et 1919, de M. Coriolis, en 1921.

i) les baies de Saint-Briac, de Lancieux, de l'Arguenon ont aussi été étudiées.

j) estuaire de la Rance — En raison de la grande étendue de son bassin et de l'importance de son marnage, la Rance a toujours paru particulièrement favorable à l'installation d'une usine marémotrice.

De très nombreuses études ont été faites à son sujet depuis cinquante ans, par divers auteurs, dont les plus connues sont celles de M. Meynard et de M. Boissier, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées en 1921, Diverses demandes de concession ont été déposées.

D'importants dossiers ont été présentés au Ministère par MM. Parisot et de Trégomain; les derniers datant de 1932 furent déposés par la Société Marémotrice de la Rance (SOMARA), pour l'aménagement de l'estuaire complet à réaliser en plusieurs étapes.

Enfin, en 1942, apparaît un projet nouveau barrant la Rance à Port Saint-Jean. Tous ces projets ont été abandonnés en faveur de celui adopté par l'Electricité de France.

k) le havre de Rothéneuf, à 5 km à l'est de Saint-Malo, a fait l'objet d'études diverses dont la plus récente est due à la Société l'«Energie des Marées».

l) baie du Mont Saint-Michel — En raison du marnage très élevé atteint dans cette baie, de la constitution relativement favorable des fonds sur une grande étendue, de nombreuses propositions ont été faites. Les plus nettes furent celles du baron Coriolis, puis de M. Maire, en 1921; dans cette dernière, la baie était barrée par une digue entre la pointe du Grouin, près de Cancale, et Granville; la production annuelle était estimée à 12 milliards et demi de kWh, le cycle utilisé était le cycle Bélidor. Le projet a été repris en 1942 par l'«Energie des Marées», avec le concours de M. Caquot.

Les idées actuelles d'Electricité de France sur l'utilisation d'une telle énergie conduisent à un projet tout différent, nous y reviendrons.

m) presqu'île du Cotentin — Tout récemment, M. Kervran a pensé utiliser, pour faire fonctionner des usines marémotrices, les différences de niveau qui

existent naturellement entre les marées sur les côtes Ouest et Est du Cotentin. De part et d'autre de la presqu'île, la différence d'amplitude en marée moyenne est de 5 m environ, les pleines et basses mers se produisant sur la côte Est avec un retard de l'ordre de trois heures.

La dénivellation qui existe ainsi entre l'Est et l'Ouest peut être utilisée pour produire de l'énergie électrique en reliant les deux côtes par un canal d'une trentaine de kilomètres environ sur lequel serait installé l'usine. Il est cependant à craindre que les grandes dimensions — qu'il serait indispensable de donner aux canaux pour que la perte de charge sur les canalisations d'amenée et de sortie ne soit pas prohibitive — ne rendent le projet peu rentable.

n) l'embranchement de la Seine a été étudiée en vue d'une installation maré-motrice, mais il semble que diverses difficultés spéciales à cette région, où le trafic de la navigation est important, se soient ajoutées à beaucoup d'autres pour contribuer à l'abandon du projet.

o) l'embranchement de la Somme, correspond à un projet de barrage très important délimitant à l'amont un plan d'eau de 4.750 hectares susceptible de produire une puissance de 480.000 CV. Un premier projet a été déposé en août 1921 par le Conseil d'arrondissement d'Abbeville; plus tard, MM. Considère et Caquot en firent une étude assez poussée.

Divers projets ont enfin fait l'objet d'études plus ou moins récentes à l'étranger. Parmi celles-ci, l'une des premières fut consacrée à la côte de Patagonie (estuaire de Santa Cruz, de Gallegos, de Descado, baie de San Julian et surtout baie de San José), et donna lieu à un rapport dès 1928.

D'autres emplacements ont fait aussi l'objet de premières réflexions. On comprendra sur simple rappel pourquoi ils n'ont pas eu pour le moment de suite:

- a) Baie de Vigo, en Espagne (1.800 hectares, amplitude maximum 3,50 m).
- b) Estuaire de la ria Santana (2.200 hectares, amplitude maximum 4,25 m longueur de digue 400 m).
- c) Détroit de Menai (Pays de Galles) entre l'île d'Anglesey et la côte galloise (2.000 hectares, amplitude maximum 6,30 m à l'extrémité Est, et 4 m à l'autre). Une étude à deux bassins a conduit à une estimation de 16 MW et 100 gWh annuels.
- d) Deux projets en Allemagne: Husum dans le Schleswig Holstein en 1912 et Wilhelmshafen en 1954 avec 3,00 de marnage et quelques milliers de H. P. chacun.
- e) Au Brésil en 1954 dans l'estuaire de San Luis de Maranhac, marnage 4,00 m 10 à 15 km² de bassin.
- f) En Nouvelle Zélande en 1952 pour utiliser la différence de niveau entre deux côtes d'un isthme Waitemato (2,70 m marnage) Manuhau (4,20 m).
- g) L'ouvrage russe récent (1955) de N. M. Scapov «Équipement mécanique des Centrales Hydrauliques» rappelle p. 222 et suivantes que l'amplitude maximum des marées varie sur les côtes soviétiques des océans Arctique et Pacifique de 1,2 m à 11 m. Rien que pour les petits golfes, les ressources d'énergie des marées atteindraient 8.200 MW. Un calcul a donné pour la Mer Blanche seule utilisée comme bassin 16.000 MW. Mais un seul projet paraît avoir été étudié, la baie Kislaja sur les côtes de Murmansk, il comporterait trois petites turbines tournant à 45 t/m sous une chute

variable de 0,5 m à 1,35 m, sous un débit de 20 à 62 m³/s: chaque turbine serait accouplée par une transmission à engrenage à un alternateur de 456 kW tournant à 750 t/m.

- h) Une étude récente hollandaise exposée aux IV^{es} Journées de l'Hydraulique (M. F. J. de VOS VI 4) expose les raisons pour lesquelles aucune usine marémotrice ne sera insérée dans le nouveau projet d'endiguement du delta Rhin-Meuse nous y reviendrons plus loin, car il s'agit là d'un projet à plusieurs fins, il suffira ici de noter que l'amplitude maximum ne dépasse nulle part 3,50 m.
- i) Bhavnager dans le golfe de Gambay (Inde) mériterait une étude poussée pour son fort marnage et son arrière pays très industrialisé (Ahmedrebad).

Quatre autres projets furent plus poussés, et nous allons en dire quelques mots:

a — Projets anglais de la Severn.

Le premier projet date de 1918 et donna lieu en 1933, à un rapport d'études et à des essais sur modèle.

On prévoyait un bassin à simple effet au vidage, et la régularisation devait être faite par pompage. On utilisait, en outre, le barrage comme pont route et viaduc de chemin de fer. Néanmoins, à cette époque, étant donné le bas prix du charbon et l'insuffisance de l'interconnexion, le projet était peu intéressant économiquement parlant, et fut abandonné.

Le manque de charbon et son prix croissant, ainsi que la demande chaque jour plus importante d'énergie, redonnèrent de l'actualité au projet et en 1943, une nouvelle Commission dite Commission Brabazon fut chargée de reprendre la question. Comme le rapport de 1933, celui de 1945 concluait à l'utilisation d'un bassin unique à simple effet au vidage (32 groupes de 25.000 kW), les passages pour la route et la voie ferrée devaient être traités en dehors de l'usine, par des ouvrages séparés, et l'idée de régulariser la production par pompage y était abandonnée, comme prohibitive, le réseau s'étant par ailleurs développé de façon considérable et pouvant, d'après la Commission, absorber cette énergie intermittente plus facilement.

L'amplitude de la marée varie de 6,7 m en morte eau, à 14,5 m en vive eau. La puissance de l'usine serait de 800.000 kW, produisant annuellement 2.294 millions de kWh.

Une des grosses difficultés de ce projet, que nous ne trouvons pas en France sur la Rance, réside dans le problème du transport de boue qui est très considérable, et qui risque de former des dépôts. Cette question est d'autant plus importante, que des ports de premier ordre (Cardiff, Newport, Avonmouth, Bristol) sont situés à proximité. Ceci a conduit la Commission à préconiser la construction d'un nouveau modèle réduit, mais les nouvelles études conduites ces dernières années, ne paraissent pas devoir donner lieu prochainement à réalisation. Un rapport récent (Congrès S. H. F. 1956) de MM. KENNEDY et HEADLAND fait le point de ce projet (IV^e Journées de l'Hydraulique — VI 3). Il expose d'une part les raisons techniques pour lesquelles il n'apparaît pas possible en décembre 1955 aux autorités anglaises de modifier les données du rapport Brabazon, d'autre part, l'équilibre économique actuel du projet. Attribuant à l'usine la recette résultant des économies de charbon (1.070.000 tonnes/an), le coût du charbon justifiant la construction de l'usine atteindrait

4,65 livres/tonne, alors que le coût actuel est seulement 3,90; d'où la décision de ne pas reprendre les études: nos considérations de point III de la première partie sur la valeur économique d'une usine marémotrice pourraient sans doute être utilement appliquées aussi à ce projet.

b) Projet canadien des estuaires de Petit Codiac et de Memramcook (fig. 20).

La baie de Fundy (Nouveau Brunswick) dans laquelle débouchent ces estuaires, a les plus fortes marées du monde: 6,4 mètres (21,1 pieds) en morte-eau, et 16,0 mètres (52,2 pieds) en vive-eau.

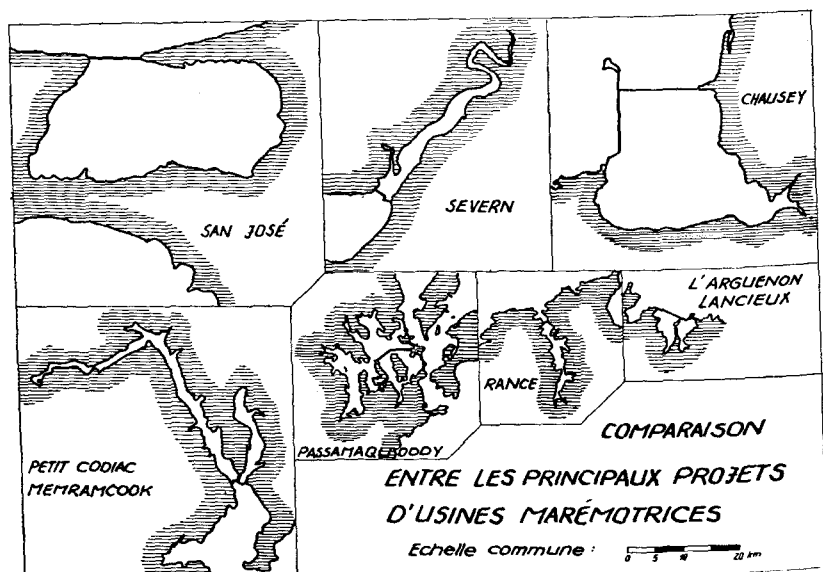


Fig. 20

D'après un rapport publié en 1945, on envisageait une usine à deux bassins, les turbines étant situées sur le barrage de séparation, mais il semble que les études n'aient pas été poursuivies, le coût par kWh apparaissant trop élevé (55 mille contre 7 pour les usines thermiques).

c) Projet américain de Passamaquoddy (fig. 21).

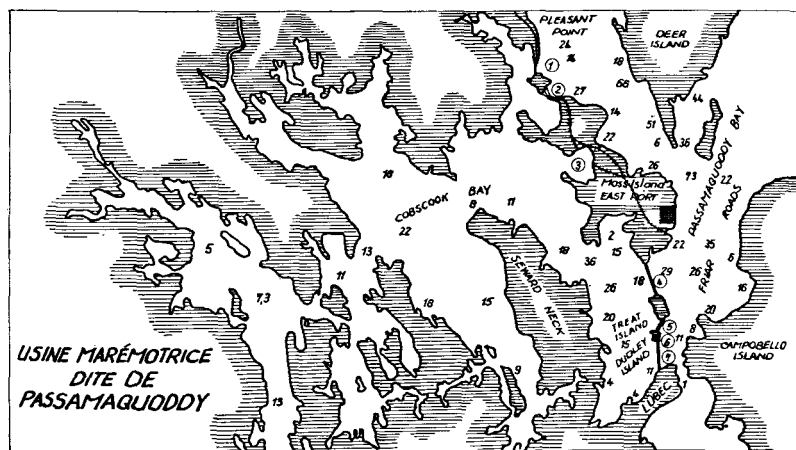
La baie de Passamaquoddy est une baie canadienne située à la frontière des Etats-Unis et du Canada et débouchant en baie de Fundy, à quelque 200 kilomètres dans le sud-ouest des estuaires de Petit Codiac et de Memramcook.

Bien que le premier projet des U.S.A., datant de 1935, porte ce nom, il ne concerne pas cette baie canadienne, car il utilise l'énergie de la baie voisine, située aux Etats-Unis, celle de Cobscook. Mais les marées y sont relativement faibles: l'amplitude en vive-eau moyenne d'équinoxe n'est que de 7,5 mètres.

La fig. 21 montre la structure du premier projet: quatre barrages appuyés sur diverses îles ferment la baie de Cobscook, des vannes ou écluses complètent

la fermeture. Les accès de l'usine doivent être creusés dans une langue de terre, les fonds entre les îles n'ayant pas paru favorables. L'usine est prévue pour comprendre 10 groupes de 10.500 kW en première étape, 20 groupes dans la conception définitive, soit au total 210.000 kW.

Le cycle utilisé est un cycle à simple effet au vidage, mais la puissance installée est si faible, que la baisse de niveau du bassin n'est que de 30 cm



EMPLACEMENT DES OUVRAGES

- | | |
|---|--|
| ① Barrage de Pleasant-Point, longueur 820 mètres | ④ Vannes |
| ② Barrage de l'île Carlow, longueur 455 mètres | ⑥ Ecluse |
| ③ Usine la longueur de terre la séparant du large doit être supprimée | ⑦ Barrage du Lubec, longueur 1150 mètres |
| ⑤ Barrage d'Eastport, longueur 1030 mètres | |

Fig. 21

environ à chaque cycle. De ce fait, l'énergie annuelle produite atteint seulement 340 millions de kWh, c'est-à-dire 8% de l'énergie naturelle, au lieu des 35% utilisés dans la Rance.

Ce projet était financé par la Federal Public Works Administration au moyen de crédits provenant du fonds de 4 milliards de dollars créé par le Président Roosevelt, le 8 avril 1935, pour lutter contre le chômage. Le crédit initial de 10 millions de dollars fut d'abord ramené à 5 millions, puis relevé à 12 millions en novembre 1935. Le coût total était évalué à 50 millions de dollars environ, mais on estimait, dès cette époque, que les recettes ne couvriraient que les charges d'exploitation, et que les charges financières resteraient à la charge de l'Etat comme la plupart des travaux nés du fonds de chômage.

Le Gouvernement américain en avait été cependant partisan, l'équipement devant être un laboratoire d'études de l'énergie des marées et préparer d'autres réalisations. Le projet était ainsi placé sur le même plan que les grands travaux d'irrigation, où la rentabilité n'est pas le seul facteur de décision.

Sa réalisation a démarré avec vigueur, et en Novembre 1935, date où l'exécution du projet battait son plein, plus de 5.000 personnes étaient sur les chantiers. Un village complet assurant le logement était presque terminé, un bâtiment d'administration comportant des bureaux pour 500 personnes, en cours de construction, des commandes pour près de 43 millions de dollars déjà passées. Cependant, le projet est abandonné complètement l'année suivante, lors de la révision générale des crédits pour lutter contre le chômage.

A intervalles réguliers, il est question de reprendre les études. Il convient de noter les différentes étapes :

- 1) Une résolution du Sénat des Etats-Unis en date du 2 février 1939 a confié à la Federal Power Commission le soin d'une nouvelle étude, le rapport du 3 avril 1941 a mis fin au projet en présentant un avis défavorable basé sur l'intermittence et l'irrégularité de la production et l'importance du coût dans une région très favorisée en énergie hydraulique.
- 2) Le 9 novembre 1948, les deux Gouvernements du Canada et des U.S.A. demandèrent à une Commission Internationale Commune de revoir le problème et de donner l'ordre de grandeur du coût d'une étude détaillée. En mars 1950, la Commission déposait son rapport sur un projet plus étendu utilisant les eaux des deux pays, le déclarant physiquement possible, mais demandant un crédit de quatre millions de dollars pour étudier son coût. Une étude du Corps of Engineers U.S. Army de mai 1952 ramenait, après examen géologique détaillé exécuté de juillet à août 1951, ce chiffre à trois millions de dollars; enfin, les 14 et 22 juillet 1953, une sous-Commission de la Commission des Affaires Etrangères de la Chambre des représentants procédait sur ce point à une vaste enquête sur deux résolutions déposées devant le 83ème Congrès au sujet de ce projet.
- 3) Finalement, le budget des U.S.A. pour l'année fiscale 1955 prévoit qu'une somme de 1 million de dollars doit y être affectée. Cependant les crédits n'ont pas été attribués, et une Commission parlementaire est chargée d'enquêter sur leur utilisation éventuelle.
Il semble, d'après les informations parvenues en France, que le Corps of Engineers (New England Division) ait commencé des études détaillées fin 1956.

d) La baie de San José (fig. 20) a d'abord donné naissance à un projet barrant la sortie de la baie, projet non viable parce que gigantesque et probablement techniquement impossible. Une étude française récente (1956) a montré qu'un canal percé pour relier les deux baies pouvait, par exemple pour un débit de 6.000 m³/sec fournir 200 MW et un milliard de GWh.

Au total, beaucoup d'emplacements, de nombreuses études, quelques avant-projets, mais rien au-delà de ce stade en dehors de la Rance, dont la construction est entreprise (loi du 8 Août 1956 du Parlement français), et de Chausey qui donnent lieu à d'importantes études activement poussées. Elles vont nous permettre d'attirer l'attention sur le processus physique de l'utilisation de l'énergie des marées, question trop négligée par les auteurs des avant-projets.

Le projet de Chausey vise à équiper dans la baie du Mont Saint-Michel, entre Granville, les Iles Chausey et la pointe du Grouin près de Cancale, 10 à 15 millions de kW. Une puissance comparable peut être attribuée au projet des Minquiers (fig. 22). Or la consommation totale de la France entière, en 1954, a atteint seulement (pertes comprises) 8,3 millions de kW, dont 4,8 de thermique. De tels projets ne se justifient donc que par l'augmentation rapide et pratiquement constante de la consommation, tant en puissance instantanée (7,1% entre les années 1954 et 1953, 77% entre 1954 et 1946) qu'en énergie annuelle (9,1% entre 1954 et 1953). Il est impressionnant de noter que le deuxième plan du décret-programme récent prévoit une onc-

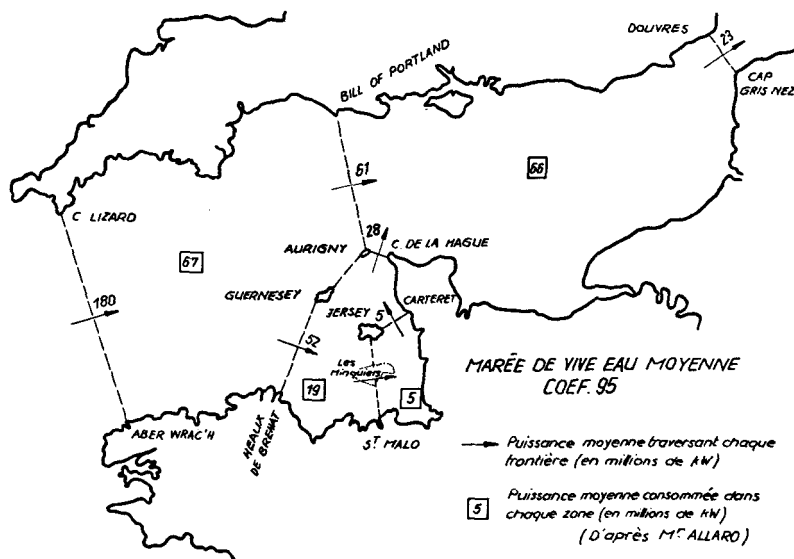


Fig. 22

somation de 70 milliards de kWh pour l'année englobant l'hiver 1960—1961 et le troisième plan en cours de préparation, 100 milliards de kWh pour l'année englobant l'hiver 1965—1966, ceci en face des 50 milliards actuels. En admettant, par exemple, que l'énergie marémotrice représente dans l'avenir, en puissance, le quart de la production totale d'énergie nouvelle créée à partir de 1956, la production de l'usine Chausey — Mont Saint-Michel trouvera sa place dans celle de l'hiver 1980, la puissance totale française étant alors de l'ordre de 50 millions de kW. Or il faut 15 ans au moins pour exécuter un tel projet. Il reste donc 10 années pour les études, ce qui ne paraît pas trop long, vu l'importance du projet.

La production au moyen des marées de puissances de cette importance, rend nécessaire l'analyse détaillée du processus physique correspondant. On ne peut plus admettre que l'usine ne modifiera pas le régime des marées caractérisé par la variation du niveau de l'eau et celle du courant, et par le

décalage dans le temps entre les courbes de variation correspondantes (déphasage). Nous avons démontré qu'il existe une limite naturelle à l'énergie que l'on peut capter, limite que le volume du bassin et l'amplitude de la marée ne suffisent pas à déterminer.

Dans une chute d'eau fluviale, l'énergie produite par l'usine est soustraite de l'énergie qui se dissipait naturellement, avant la création du barrage, en remous, tourbillons, frottements divers, et la limite maximum de l'énergie transformable est égale au total de ces pertes. Devons-nous, par analogie, considérer l'énergie dissipée par la marée comme la limite que nous recherchons? Ainsi, l'énergie traversant l'emplacement du barrage de la Rance⁽¹⁾, différence entre l'énergie entrant à marée montante, et l'énergie sortant à marée descendante, est dissipée par frottements dans l'estuaire; car nous pouvons, à bon droit, négliger le débit de la rivière Rance.

Cette question fondamentale se prête bien au calcul: la fig. 22 résume les résultats obtenus par M. ALLARD (Annales de Géophysique, t, 7, 1951) en donnant pour différents profils, en millions de kilowatts pour la marée de vive-eau moyenne (coefficient 95), les puissances moyennes comptées positivement suivant les sens donnés dans la figure. (Les chiffres encadrés, obtenus par différence des puissances traversant les profils, donnent dans les mêmes conditions les puissances dissipées. Les chiffres correspondants à la moyenne sur une année sont à peu près égaux à la moitié des chiffres de la fig. qui donnent la puissance moyenne pour une marée de vive-eau).

Les puissances dissipées sont étonnamment faibles: la puissance dissipée en moyenne annuelle dans le secteur Saint-Maloe-Jersey — Carteret sur une surface de 3.200 km² est de l'ordre de deux millions de kilowatts, ce qui donnerait environ 350.000 MW pour la puissance moyenne consommée dans la baie du Mont Saint-Michel. En adoptant des chiffres plus élevés pour la Rance, afin de tenir compte de frottements plus élevés et par suite d'une plus grande puissance dissipée par unité de surface, nous obtenons un maximum de 60.000 kW dissipés en moyenne dans l'estuaire de la Rance⁽²⁾. Les projets d'usine dans la baie du Mont Saint-Michel visent à équiper de 10 à 15 millions de kilowatts, soit de 30 à 50 fois la puissance actuellement dissipée. Les énergies que nous comptons utiliser, sont très supérieures aux énergies dissipées naturellement. L'analogie avec les chutes d'eau est donc trompeuse. Ceci signifie simplement que nous ne pouvons espérer équiper des usines marémotrices de grande puissance sans modifier le régime des marées, il nous faudra attirer l'énergie qui actuellement se dissipe en d'autres lieux.

Or, la puissance totale dissipée en moyenne dans l'année et calculée dans les mêmes conditions, atteint au maximum pour la Manche, 80 millions de kilowatts, soit à peu près le même chiffre que celui de la puissance électrique consommée aux U.S.A. Encore convient-il de remarquer, avant de généraliser, que les océans profonds, à eux tous, Atlantique, Pacifique, Océan Indien, Antarctique, etc... dissipent une bien faible part de l'énergie des marées, un

¹⁾ En fait, l'action des astres sur les eaux de l'estuaire apporte en sus une puissance non nulle, mais en fait négligeable, quelques dizaines de kilowatts par km², moins de 1.000 kW pour tout l'estuaire de la Rance.

²⁾ On retrouve l'ordre de grandeur de ces chiffres par l'observation des courants en Rance et de leur décalage actuel avec les dénivellations de la marée.

million de kilowatts au maximum, soit, 3 W/km². Seules comptent en fait, dans le bilan mondial, les mers peu profondes et resserrées comme la Manche, la Mer d'Irlande, la Mer du Nord, le détroit de Behring, celui de Malacca, etc... Au total, la puissance moyenne dissipée par les marées sur le globe tout entier est de l'ordre du milliard de kilowatts. Ceci reste du même ordre de grandeur que l'énergie moyenne horaire de toute sorte consommée par les humains (eau, charbon, pétrole, gaz naturel, etc...). Cette immense palpitation qui frappa d'effroi les guerriers d'Alexandre aux bouches de l'Indus, est faite à bien peu de frais, et l'on étonnerait le navigateur en lui affirmant que cette puissance n'est pas supérieure à celle mise en jeu par l'homme dans les machines inventées par lui.

Ces calculs d'énergie dissipée donnent sans doute, malgré leurs imperfections, une idée assez juste du bilan mondial, car le chiffre trouvé explique bien la contradiction entre la théorie et l'observation pour l'accélération séculaire du moyen mouvement de la lune. Le contre-coup sur le lune de la variation séculaire de l'excentricité de l'orbite terrestre produite par les perturbations séculaires explique 7'',1 d'arc, l'observation donne 11'',9. (Laplace, dans une première théorie du contre-coup, avait trouvé 12'', mais sa théorie comportait un facteur 2 erroné, ce que ses successeurs découvrirent avec regret, posant ainsi le problème de l'écart). Cette différence de 4'',8 par siècle donne 32' d'arc au bout de 20 siècles, c'est-à-dire une erreur égale au diamètre même de la lune, ce dont on est sûr par les observations d'éclipses des Chaldéens et des Arabes. L'analyse détaillée du problème s'énonce par l'équation suivante :

$$11'',9 = 7'',1 + 8'',4 + 0'',7 - 4'',3$$

Les termes 8'',4 et 0'',7 sont dûs au ralentissement de la rotation terrestre par le frottement des bourrelets de marée provoquée par la lune et le soleil, le terme négatif - 4'',3, au ralentissement du mouvement de la lune provoqué par l'attraction du bourrelet de marée. La décélération de la terre est donc de 9'',1 d'arc par siècle, soit un jour entier après 7.200 ans. La puissance libérée par ce ralentissement de la rotation de la terre est de 1,5 milliard de kilowatts. On retrouve bien l'ordre de grandeur précédent. Notre problème d'utilisation de l'énergie des marées s'est trouvé pour un instant lié aux observations des astronomes Chaldéens, magie de l'intelligence humaine.

Ce serait une erreur d'estimer que ce chiffre de un milliard de kilowatts est la limite supérieure de ce que les hommes peuvent tirer de l'énergie des marées. Le problème est plus complexe, car la transformation d'énergie pourrait provoquer un ralentissement supplémentaire de la terre, un milliard de kilowatts supplémentaires étant libérés si l'on accepte de perdre un jour après 2.000 ans.

Nous ne pouvons donc nous appuyer sur l'énergie dissipée; mais si nous acceptons l'idée de modifier le régime même des marées, en étudiant les variations de l'énergie accumulée dans une aire, nous saurons imaginer un cycle permettant de prélever une quantité considérable d'énergie par des manoeuvres convenables de vannes et de turbines. L'énergie entrante ne sera plus restituée en grande partie comme maintenant aux zones adjacentes.

Des études difficiles sont en cours; elles se déroulent de façon satisfaisante, mais il est trop tôt pour en rendre compte ici. Il nous suffira de dire que le décalage dans le temps entre étales de courant et étales de niveau sera fortement modifié et non l'amplitude des variations ni les valeurs extrêmes des hauteurs d'eau et des courants.

Conclusion

On nous permettra en finissant de rappeler cependant trois points essentiels:

- 1) il y a dans le monde un nombre très limité d'emplacements favorables à l'implantation d'une grande usine marémotrice.
- 2) a priori les usines sont d'autant plus intéressantes qu'elles sont plus grandes et ne le deviennent guère qu'à partir d'une production annuelle de l'ordre du milliard de kWh. Ceci d'une part rend plus difficile ou plus tardive l'intégration nécessaire dans un réseau interconnecté de puissance convenable et d'autre part ceci soulève des problèmes technologiques ou scientifiques non encore complètement résolus, et justifie bien la politique actuelle de la France: réaliser aujourd'hui une usine d'importance moyenne, la Rance (un milliard de kWh annuels) et étudier à fond pour préparer l'avenir un grand projet, Chausey (vingt ou trente fois plus important).
- 3) les études d'une usine même d'importance moyenne sont délicates, car il n'y a pas de précédent et la dynamique des mers est une science difficile. On ne pourra donc songer à développer l'énergie des marées dans le monde si on se contente de l'expérience que va conquérir la France avec la Rance. Il faut l'étendre à d'autres cas posant les problèmes sous d'autres éclairages.

Bibliographie

Publications parues depuis le 1^{er} Janvier 1952

- [1] *Ailleret, P.*, Nov. 1952, «Les projets français de centrales marémotrices vues à l'échelle de l'Europe».
Extrait du Bulletin de l'Union des Exploitations Electriques en Belgique n° 5.
 - [2] *Allard, P.*, Sept. 1952, «Bilan Energétique de la marée de vive-eau pour la Manche entière».
Bulletin du C. O. E. C. n° 8.
 - [3] *Biesel, F.*, Juin 1956, «Quelques remarques à propos de l'influence de la Force de Coriolis sur les marées de la Manche».
E. M.¹⁾ — Question II — Rapport n° 10.
 - [4] *Bonnefille, R.*, Juin 1956, «Etude de la marée en Manche».
E. M. — Question II — Rapport n° 2.
 - [5] *Carteron, J.*, Juin 1956, «Utilisation d'un calculateur électronique pour l'intégration numérique de l'équation aux dérivées partielles
- $$\frac{d^2 Z}{dx^2} + \frac{d^2 Z}{dy^2} + (R + jS) Z = 0.$$
- E. M. — Question IV — Rapport n° 8.
- [6] *Cohen de Lara, G.*, Juin 1956, «Etude de l'infiltration dans les digues en enrochements — Application au cas des batardeaux de coupure».
E. M. — Question IV — Rapport n° 7.

¹⁾ L'abréviation E. M. est une référence aux rapports sur «Les Energies de la Mer» présentées au cours des IV^{es} Journées de l'Hydraulique organisées par la Société Hydrotechnique de France, à Paris, du 13 au 15 Juin 1956, rapports en cours de publication.

- [7] *Dieulot, G.*, Juin 1956, «Les enregistrements de la houle au large de Chausey à l'aide d'un sondeur à ultra-sons». E. M. — Question I — Rapport n° 6.
- [8] *Dieulot, G.*, Juin 1956, «Les mesures de courant dans la baie du Mont Saint-Michel». E. M. — Question II — Rapport n° 3.
- [9] *Eyries, M.*, Juin 1956, «Les bases théoriques du problème des marées océanographiques, et les solutions actuellement connues». E. M. — Question II — Rapport n° 4.
- [10] *Gibrat, R.*, Mai 1953, «L'Energie des Marées». Bulletin de la Société Française des Electriciens. 7^e Série — Tome III — n° 23.
- [11] *Gibrat, R.*, Janv. 1954, «Premiers critères de comparaison des divers turbo-machines au point de vue des usines marémotrices». Extrait de la Revue LA HOUILLE BLANCHE n° 1.
- [12] *Gibrat, R.*, Mai 1955, «Exploitation des usines marémotrices compte tenu des limitations imposées aux vitesses de variation des débits». Extrait de LA HOUILLE BLANCHE n° spécial A/1955.
- [13] *Gibrat, R.*, Mars 1956, «Les plans de production d'énergie électrique et les usines marémotrices». Extrait de la Revue FLAMME ET THERMIQUE n° 90.
- [14] *Gibrat R.*, Mars 1956, «La joie de comprendre». Extrait du Bulletin de la Société Française des Electriciens. 7^e Série — Tome VI — n° 63.
- [15] *Gibrat, R.*, Avril 1956, «L'usine marémotrice de la Rance». Extrait de la Revue Française de l'Energie.
- [16] *Gibrat, R.*, et *Kammerlocher, L.*, Mai 1956, «Les alternateurs de l'usine marémotrice de la Rance». Rapport à la Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques n° 134.
- [17] *Gibrat, R.*, Juin 1956, «Cycles d'utilisation de l'énergie marémotrice». E. M. — Question VI — Rapport n° 1.
- [18] *Gibrat, R.*, Juin 1956, «L'exploitation d'une usine marémotrice en régime d'économie de charbon». E. M. — Question VI — Rapport n° 2.
- [19] *Gibrat, R.* et *Auroy, F.*, Juin 1956, «Problème posé par l'utilisation de l'énergie des marées». V^e Conférence Mondiale de l'Energie — Vienne — Section III — Sous-section H.
- [20] *Gougenheim, A.*, Mars 1953, «Sur la fréquence des coefficients de marées». Bulletin C. O. E. C. — V^e Année n° 3.
- [21] *Guimbal, J.*, Mars 1954, «Les nouveaux groupes de la centrale prototype de Castet». Extrait de LA HOUILLE BLANCHE n° 2.
- [22] *Greslou*, Juin 1956, «Réglage des courants sur un modèle à marée». E. M. — Question IV — Rapport n° 6.
- [23] *Kammerlocher, L.* et *Duclos J.*, Juin 1956, «Evolution constructive des groupes de l'usine de la Rance». E. M. — Question VI — Rapport n° 6.
- [24] *Kennedy, G.* et *Headland, H.*, Juin 1956, «Etude d'usines marémotrices sut la Severn». E. M. — Question VI — Rapport n° 3.
- [25] *Kerran, L.*, Août 1956, «Etude d'un projet d'usine marémotrice à double flot entre Lessay et Carentan (Cotentin)». Article paru dans la Revue GENIE CIVIL n° 3426—3427.
- [26] *Lacombe, H.*, Sept. 1955, «Essai d'explication du mécanisme de la marée dans le golfe de Saint-Malo». Extrait de LA HOUILLE BLANCHE n° B.

- [27] *Masse, P. et Gibrat, R.*, Oct. 1956, «Application des problèmes linéaires aux investissements de production d'électricité.
Rapport à la Session de Los Angeles du National Meeting de l'Institute of Management Sciences.
- [28] *Mauboussin, G.*, Juin 1956, «Construction de l'usine marémotrice de la Rance — Contribution des essais sur modèle réduit à la mise au point d'un mode d'exécution des travaux».
E. M. — Question IV — Rapport n° 1.
- [29] *Michon, X. et Goddet, J.*, Juin 1956, «Aménagement de l'estuaire de la Rance — Modèle réduit de la station d'essais de Saint-Malo Saint-Servan».
E. M. — Question IV — Rapport n° 3.
- [30] *Michon, X. et Bonnefille, R.*, Juin 1956, «La marée dans la Manche — Construction et réglage d'un modèle réduit».
E. M. — Question IV — Rapport n° 4.
- [31] *Peltier, A.*, Juin 1956, «Intégration numérique de l'équation aux dérivées partielles
- $$\frac{d^2 Z}{dx^2} + \frac{d^2 Z}{dy^2} + (R + jS) Z = 0.$$
- par une méthode d'analogie électrique».
E. M. — Question IV — Rapport n° 9.
- [32] *Robert, R. et Dupont, J. et Favez, B.*, Juin 1956, «Influence de la houle sur le fonctionnement des groupes hydroélectriques marémoteurs».
E. M. — Question III — Rapport n° 2.
- [33] *Schonfeld, J. C.*, Juin 1956, «Circulation de l'énergie des marées dans les mers littorales».
E. M. — Question II — Rapport n° 12.
- [34] *Surrel, G.*, Juin 1956, «Modèles réduits — Appareil à reproduire la marée — Evolution et état actuel».
E. M. — Question IV — Rapport n° 2.
- [35] *Vantroys, L.*, Fevr. 1953, «L'Energie des Marées».
Extrait de la Revue ELECTRICITE.
- [36] *Vantroys, L.*, Fevr. 1954, «Les Minquiers et les projets français d'usines marémotrices».
Extrait du Bulletin C. O. E. C. Tome VI — n° 2.
- [37] *Vantroys, L.*, Juin 1956, «Nature de l'énergie des marées».
E. M. — Question II — Rapport n° 7.
- [38] *Vantroys, L.*, Juin 1956, «Perturbation apportée au régime des marées par le fonctionnement d'une usine marémotrice».
E. M. — Question II — Rapport n° 8.
- [39] *Vantroys, L.*, Juin 1956, «Le régime des marées dans la Manche — Influence de la rotation de la terre — Rapport sur les travaux de la Commission d'études».
E. M. — Question II — Rapport n° 9.
- [40] *de Vos, F. J.*, Juin 1956, «Raisons pour lesquelles aucune usine marémotrice ne sera insérée dans le nouveau projet d'endiguement (Deltaplan) en Hollande».
E. M. — Question VI — Rapport n° 4.
- [41] *Voyer, F.*, Mars 1953, «Usine marémotrice de la Rance».
Extrait de la Revue ELECTRICITE.
- [42] *Voyer, F. et Peuel, M.*, Juin 1956, «Les calculs de la production d'une usine marémotrice».
E. M. — Question VI — Rapport n° 5.